

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería de la Energía

Análisis comparativo de materiales para diferentes tecnologías fotovoltaicas

Autor: Álvaro Naz García

Tutor: Isidoro Lillo Bravo

Dep. Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2016



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de la Energía
Energías Renovables

Análisis comparativo de materiales para diferentes tecnologías fotovoltaicas

Autor:
Álvaro Naz García

Tutor:
Isidoro Lillo Bravo
Profesor Contratado Doctor

Dep. de Ingeniería Energética
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2016

Trabajo Fin de Grado: Análisis comparativo de materiales para diferentes tecnologías fotovoltaicas

Autor: Álvaro Naz García

Tutor: Isidoro Lillo Bravo

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2016

El Secretario del Tribunal

A mi familia

Agradecimientos

Quiero dar las gracias a mi familia,

por su apoyo y ánimo incondicional, por estar siempre.

Gracias porque si he llegado hasta aquí ha sido gracias a vosotros.

Agradecer también a mi tutor, Isidoro Lillo, por su paciencia y por darme solamente facilidades.

A mis amigos de la carrera, mucho más que compañeros de clase, por haber compartido conmigo los mejores momentos y por los que nos quedan por compartir. Gracias a vosotros estos años han sido maravillosos.

Resumen

Este trabajo fin de grado trata sobre el estudio de materiales altamente reflectantes que pudieran ser aplicados al aumento de la generación solar fotovoltaica urbana. Buscando las combinaciones óptimas, se han analizado diferentes tipos de tecnologías fotovoltaicas y de materiales a través del estudio de los espectros de absorción de cada tipo de célula y los espectros de reflexión de cada material.

La generalización de la fotovoltaica urbana tendría grandes beneficios como el aumento de la generación renovable, la disminución de la contaminación, la mejora de la salud de los ciudadanos, el fomento del empleo local, el progreso regional y la facilitación del acceso a la energía, entre otros. Esto, junto con las previsiones de crecimiento de la energía solar urbana hace que sea un campo con mucho potencial de desarrollo.

Abstract

This final degree project is about the study of highly reflective materials that could be applied to the increasing of urban photovoltaic generation. In search of the optimum combinations, different types of photovoltaic technologies and materials have been analyzed through the study of the absorption spectrum of each type of cell and the reflection spectrum of each material.

The generalization of urban photovoltaic production would have great benefits, such as the rising of renewable generation, reduction of pollution, improvement in citizens' health, encouragement of local employment, regional progress and improvement of energy access, among others. All this, added to the growing predictions of urban solar energy, make it a field with vast development potential.

Agradecimientos	ixx
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xviii
Notación	xxi
1 Introducción	1
2 Objetivo	9
2.1. <i>Aplicación a FV en la edificación</i>	9
2.2. <i>Otras aplicaciones</i>	9
2.2.1. Agricultura	9
2.2.2. Edificación	11
3 Análisis Bibliográfico	14
3.1. <i>Tecnologías Fotovoltaicas</i>	14
3.1.1. Más utilizadas	14
3.1.2. Espectros de absorción	16
3.2. <i>Radiación</i>	22
3.3. <i>Temperatura</i>	25
3.4. <i>Preselección de Materiales</i>	30
3.4.1. Propiedades	30
3.4.2. Materiales reflectantes existentes	36
3.4.3. Colores y texturas	39
3.4.4. Deterioro y ensuciamiento	44
3.4.5. Costes	44
3.4.6. Conclusiones	46
4 Muestras Relacionadas	48
4.1. <i>Ensayos</i>	48
5 Conclusiones	64
6 Líneas de Trabajo Futuro	66
7 Bibliografía	67
Glosario	70
Anexo A	71
Anexo B	77
Anexo C	84

Índice de Tablas

Tabla 3.2.1 Irradiancia Solar Global Espectral	23
Tabla 3.4.1.1 Albedos y Emisividades Típicas	33
Tabla 3.4.1.2 Emisividades Comunes	35
Tabla 3.4.2.1 Reflectancia de algunos Materiales de Construcción	38
Tabla 3.4.3.1 Clasificación de Texturas y Colores	41
Tabla 3.4.3.2 Enumeración de Texturas y Colores	42
Tabla 3.4.5.1 Estudio Económico Modelo I	45
Tabla 3.4.5.2 Estudio Económico Modelo II	45
Tabla 3.4.5.3 Estudio Económico Modelo III	46
Tabla 4.1.1 Ensayo Reflectividad Espectral	71

Índice de Figuras

Figura 1.1 Energía Primaria Mundial por Región	2
Figura 1.2 Energía Primaria Mundial por Fuente	3
Figura 1.3 Emisiones de CO ₂ Mundial en 2014	3
Figura 1.4 Evolución de Emisiones de CO ₂ Mundial por Fuente	4
Figura 1.5 Emisiones Acumuladas de CO ₂ por Región	4
Figura 1.5 Evolución de la Potencia Eólica y Fotovoltaica Mundial Instalada	5
Figura 1.6 Evolución de la Energía Primaria	6
Figura 1.7 Evolución del Autoabastecimiento y las Renovables	6
Figura 1.8 Uso de las Fuentes Energéticas	7
Figura 1.9 Distribución de Empleos en el Sector Energético	7
Figura 1.10 Balance Energético en Andalucía	8
Figura 2.2.2.1 Comparación Envolverte Reflectante	11
Figura 3.1.1.1 Fabricación Fotovoltaica	14
Figura 3.1.1.2 Producción Fotovoltaica I	15
Figura 3.1.1.3 Producción Fotovoltaica II	15
Figura 3.1.1.4 Producción FV de Lámina Delgada	16
Figura 3.1.2.1 Efecto Fotovoltaico	17
Figura 3.1.2.2 Eficiencia Cuántica de una Célula Solar de Silicio	17
Figura 3.1.2.3 Respuesta Espectral de una Célula Solar de Silicio Bajo Vidrio	18
Figura 3.1.2.4 Eficiencia Cuántica Interna y Externa	19
Figura 3.1.2.5 Respuesta Espectral por Tecnología I	20
Figura 3.1.2.5 Respuesta Espectral por Tecnología II	20
Figura 3.1.2.7 Respuesta Espectral Relativa	21

Figura 3.1.1.8 Células Multicapa	21
Figura 3.2.1 Espectro Solar	22
Figura 3.2.2 Espectro Solar Global Integrado	24
Figura 3.3.1 Curva I-V	25
Figura 3.3.2 Efecto de la Temperatura I	26
Figura 3.3.3 Efecto de la Temperatura II	26
Figura 3.3.4 Efecto de la Irradiación	27
Figura 3.3.5 Ficha Técnica Panel	28
Figura 3.3.6 Curvas de Pmax (W) y Tp (°C) en función de la Irradiancia (W/m2)	29
Figura 3.4.1.1 Respuesta Espectral con Recubrimiento Selectivo	31
Figura 3.4.1.2 Distribución Energía Solar	34
Figura 3.4.2.1 Reflectancia Espectral de algunos Materiales de Contrucción I	37
Figura 3.4.2.2 Reflectancia Espectral de algunos Materiales de Contrucción II	38
Figura 3.4.2.3 Reflectancia Espectral de algunos Metales	39
Figura 3.4.3.1 SRI y Diferencias de Temperaturas Típicas	40
Figura 3.4.3.2 SRI para varias Texturas y Colores	43
Figura 4.1.1 Espectrorradiómetro Licor LI-1800	49
Figura 4.1.2 Respuesta Espectral por Tecnología I	51
Figura 4.1.3 Ensayo del Aluminio Anodizado	52
Figura 4.1.4 Ensayo del Cemento Blanco	53
Figura 4.1.5 Ensayo de los Materiales	53
Figura 4.1.6 Ranking Irradiancia Reflejada Integrada	55
Figura 4.1.8 Silicio Monocristalino Ranking Intensidad Convertida Integrada	57
Figura 4.1.9 Silicio Policristalino Ranking Intensidad Convertida Integrada	57
Figura 4.1.10 Silicio Amorfo Ranking Intensidad Convertida Integrada	58
Figura 4.1.11 CdTe Ranking Intensidad Convertida Integrada	58
Figura 4.1.12 CIGS Ranking Intensidad Convertida Integrada	59
Figura 4.1.13 Aluminio Lacado Ranking Intensidad Convertida Integrada	60
Figura 4.1.14 Pintura Dióxido Titanio Ranking Intensidad Convertida Integrada	61
Figura 4.1.15 Pintura Acrílica Ranking Intensidad Convertida Integrada	61
Figura 4.1.16 Cemento Blanco Ranking Intensidad Convertida Integrada	62
Figura 4.1.17 Cemento Blanco Arena Ranking Intensidad Convertida Integrada	62
Figura 4.1.18 Aluminio Anodizado Ranking Intensidad Convertida Integrada	63
Anexo B	77
Anexo C	84

El número entre corchetes que tienen algunas figuras representa el documento de la bibliografía del que se ha obtenido.

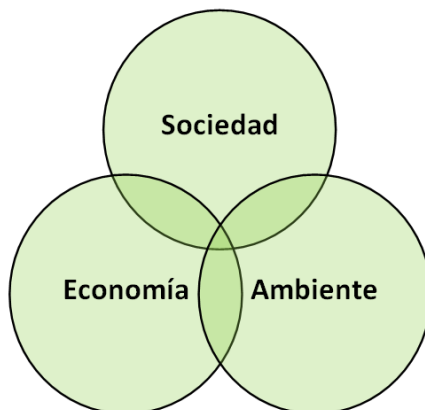
Notación

μm	Micrómetro
nm	Nanómetro
GWp	Gigavatio Pico
λ	Longitud de Onda
AM	Masa de Aire
$\frac{\partial x}{\partial y}$	Incremento de x con respecto a y
STC	Condiciones Estándar
ϵ	Emisividad
δ	Constante de Stefan-Boltzmann
Q_{Rad}	Calor por Radiación
\hat{a}	Albedo
E_g	Energía de la Banda Prohibida
eV	Electrón Voltio
SIP	Revestimiento de composición acrílica
CW	Revestimiento de composición de cemento
rf	Rulato Travertino Fino
rg	Rulato Travertino Grueso
lf	Llaneado Fino
lg	Llaneado Grueso
gm	Granitex Medio

tr	Texturable Rulato
tt	Texturable Travertino
ss	Salpicrate Salpic
sp	Salpicrate Planchado
gm	Granitex Medio

1 INTRODUCCIÓN

La energía es un recurso limitado pero imprescindible para nuestro modo de vida. Tiene efectos muy importantes sobre aspectos fundamentales, como son la sociedad, la economía y el medio ambiente. Esto hace que el sector energético sea multidisciplinar y muy complejo.



Impacto

Sin lugar a dudas, la energía tiene un impacto neto positivo en el mundo. Todos y cada uno de los avances experimentados por la sociedad tienen como denominador común la energía, imprescindible para avanzar en el desarrollo de las comunidades y hacer funcionar el sistema productivo, generando y transportando los bienes y servicios que la sociedad necesita para disfrutar de un elevado nivel de bienestar.

Aunque el uso de la energía siempre genera impactos sobre el medio, la fuente energética y la tecnología empleada en cada caso modula la magnitud y las consecuencias de dicho impacto. El fenómeno del cambio climático, la contaminación marina, el agotamiento de los recursos naturales, el uso del agua, la ocupación del territorio o el aumento de enfermedades asociadas a la contaminación del aire, son consecuencias de un modelo energético, fundamentado en el uso de recursos principalmente fósiles, que ha llegado a situaciones límite en muchas ocasiones.

Impacto sobre el desarrollo económico

Son reconocidas las oportunidades de generar crecimiento económico y empleo mediante la innovación y el desarrollo de una política energética competitiva y sostenible, especialmente cuando la producción de energía renovable y los proyectos de eficiencia dependen de pequeñas y medianas empresas.

La disminución de la dependencia energética permite reducir la factura energética de una región, ya que se reducen las compras de combustibles en el exterior: carbón, petróleo y gas.

El impulso del autoconsumo como un cambio hacia la producción descentralizada de energía entraña numerosas ventajas derivadas de la utilización de fuentes energéticas locales y de minimizar las pérdidas en transporte y distribución, con lo que además se obtiene una mayor seguridad del suministro local de energía.

Impacto sobre el medio ambiente y la salud

El cambio climático es el principal problema ambiental que afronta nuestra civilización en la actualidad. La planificación energética debe abogar por el ahorro y la eficiencia energética, así como por una mayor utilización de energías renovables. Esto provocará la disminución de emisiones de CO₂, partículas y otros gases contaminantes, la disminución del riesgo de vertidos, la mejora en la gestión de los recursos naturales y de los residuos producidos por la actividad humana.

Además, se debe actuar en materia de movilidad sostenible y en relación a la transición del consumo energético fósil al renovable en zonas urbanas, lo cual producirá una mejora de la calidad del aire que se respira en las ciudades, y por consiguiente, una mejora de la calidad de vida.

Impacto sobre la ciudadanía

La energía tiene un impacto directo sobre la calidad de vida de los habitantes de una región. Existe una relación íntima entre el acceso a la energía y el “Índice de Desarrollo Humano” (IDH), elaborado por el “Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo” (PNUD) para cuantificar el desarrollo humano de un país.

La utilización de energías renovables provoca que la generación sea más distribuida que la tradicional. Dicha descentralización fomenta también el desarrollo y la cohesión de la comunidad, al facilitar una fuente de ingresos y crear empleo a escala local, reactivando el sector empresarial relacionado: empresas fabricantes y proveedoras de equipos, instaladoras, ingenierías y consultorías, etc.

La energía renovable podría convertirse en un instrumento fundamental para alcanzar el “Objetivo de Desarrollo Sostenible 7.1 de las Naciones Unidas”, dirigido a garantizar el acceso universal a servicios energéticos asequibles, seguros y modernos para 2030.

Entre los nuevos ámbitos de trabajo se incluyen las tecnologías de energía solar fotovoltaica, que constituyen una parte importante de las estrategias de energía renovable en muchos países.

Se calcula que en 2014 las energías renovables (excluyendo las grandes hidroeléctricas, que contaban aproximadamente con 1,5 millones de puestos de trabajo directos) dieron empleo a 7,7 millones de personas directa e indirectamente. La energía solar fotovoltaica es el principal empleador renovable a escala mundial, generando 2,5 millones de empleos.

Contexto energético mundial

En estos últimos años se observa un nuevo escenario energético mundial. Países han emergido económicamente y se han convertido en grandes demandantes de energía. China, que en el año 2010 ya desbancó a Estados Unidos como primer consumidor mundial de energía, acaparó casi el 22% del consumo de la energía primaria mundial en 2012. Entre los meridianos 60°E y 130°E, desde Pakistán hasta Corea del Sur, se concentra el 54% de la población y el 40% del consumo mundial, siendo sus tasas de crecimiento energético de más del doble que la media del planeta.

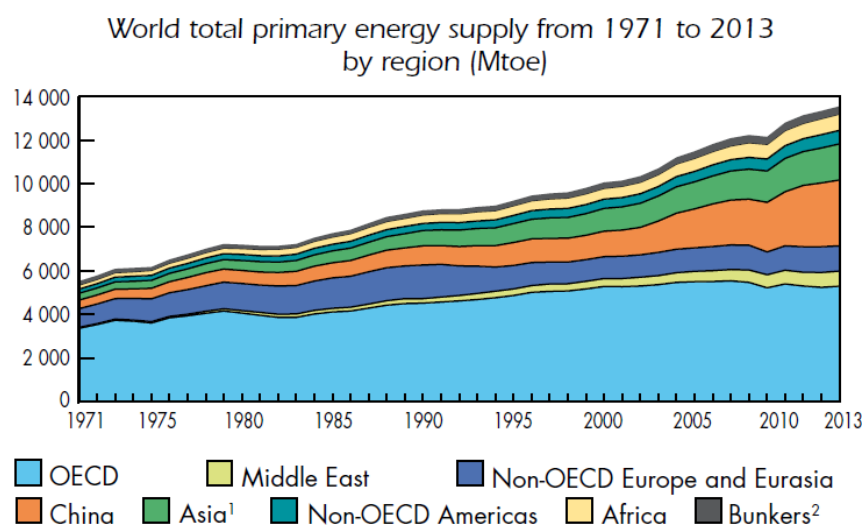


Figura 1.1 Energía Primaria Mundial por Región [10]

World¹ total primary energy supply (TPES) from 1971 to 2013
by fuel (Mtoe)

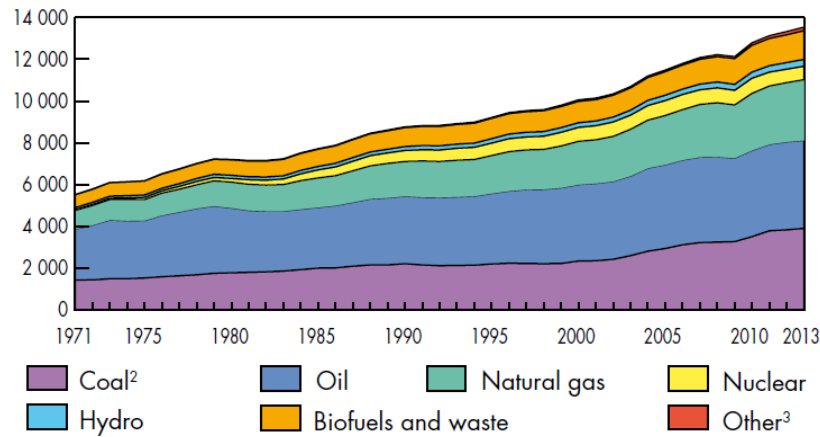


Figura 1.2 Energía Primaria Mundial por Fuente [10]

A nivel mundial, las emisiones de CO₂ provocadas por el uso de la energía crecieron en 2012 un 1,9%. Con las proyecciones que se derivan de los escenarios energéticos actuales, la temperatura en la Tierra subiría 3,6°C en 2050, nivel que está muy por encima del considerado por los expertos como límite a partir del cual la vida en el planeta cambiaría de forma significativa a como lo es en la actualidad.

24

Energy-related CO₂ emissions in selected regions, 2014

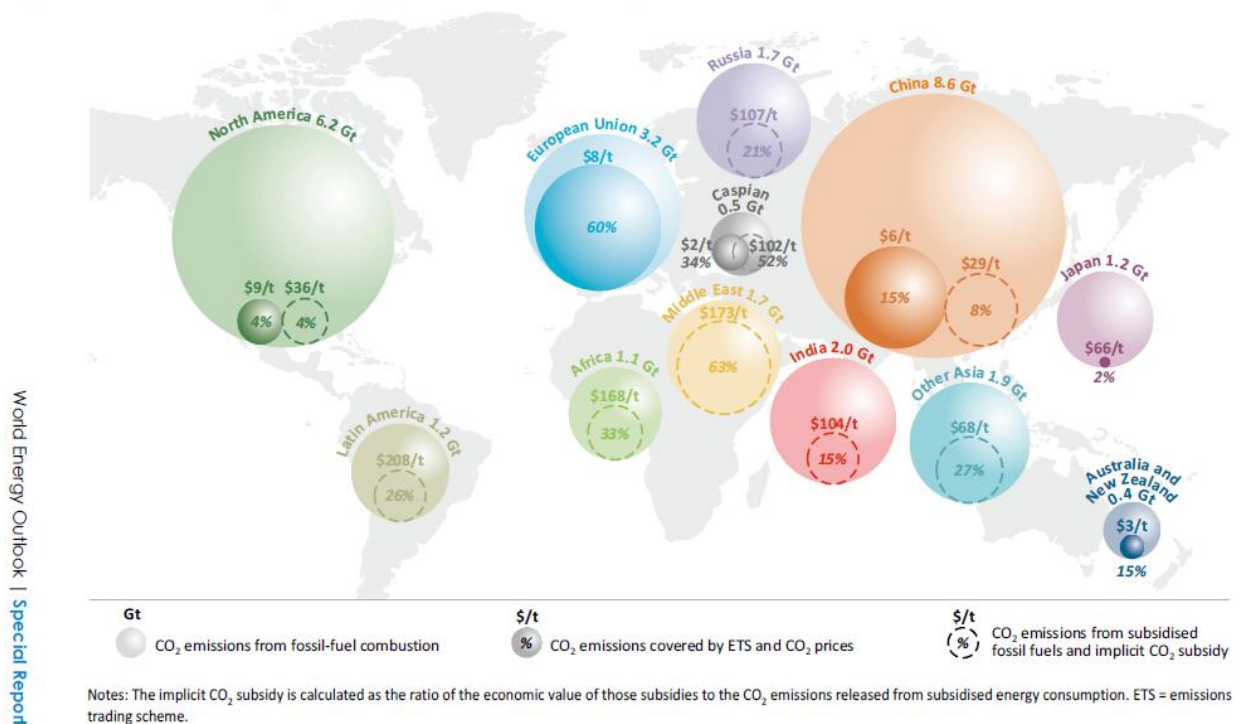


Figura 1.3 Emisiones de CO₂ Mundial en 2014 [7]

China se propuso reducir un 16% su intensidad energética en 2015, la Unión Europea ha fijó una reducción del 20% del consumo en el año 2020 habiendo aprobado el Parlamento Europeo en la resolución de 5 de febrero de 2014 una reducción del consumo del 40% para 2030, año en el que Japón prevé reducir un 10% el consumo eléctrico.

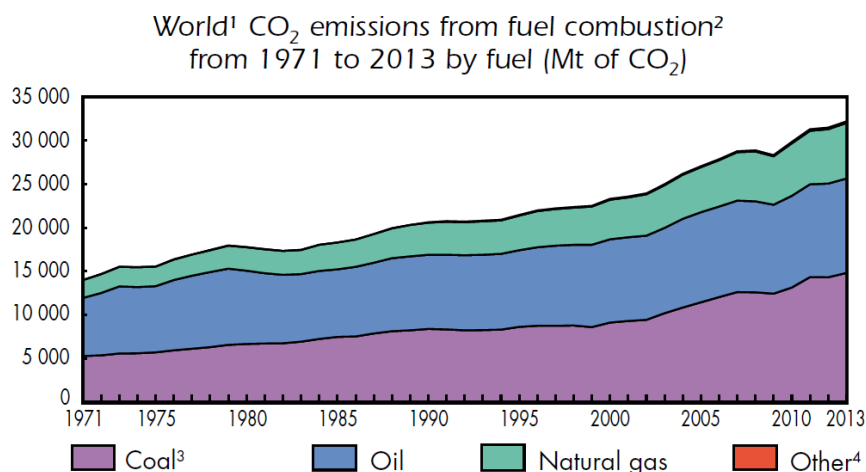


Figura 1.4 Evolución de Emisiones de CO₂ Mundial por Fuente [10]

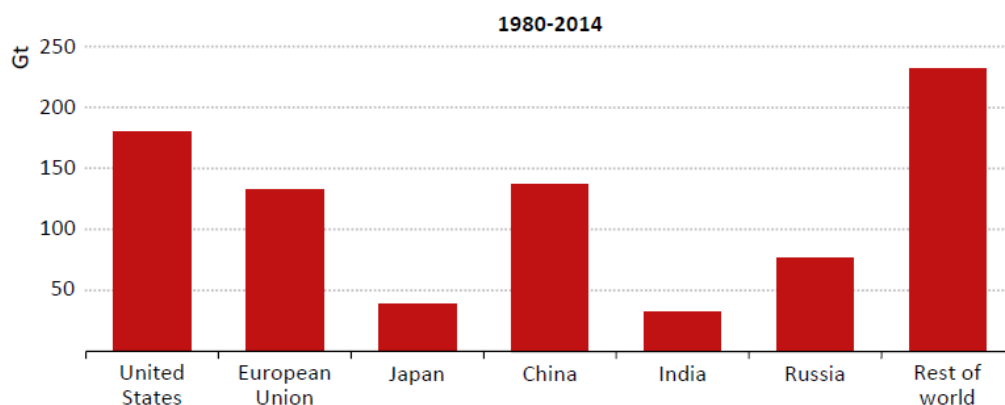


Figura 1.5 Emisiones Acumuladas de CO₂ por Región [7]

Además de las actuaciones en ahorro y eficiencia energética, las energías renovables están experimentando un crecimiento notable. Entre los años 2000 a 2012 se ha multiplicado por cerca de 5,3 el consumo de energías renovables (sin incluirla gran hidráulica), mientras que la demanda mundial de energía se ha multiplicado por 1,3. En este periodo, la potencia eólica instalada se ha multiplicado por dieciséis, la fotovoltaica por setenta y la termosolar ha experimentado un fuerte despegue desde su aparición. Es muy significativo el alto crecimiento de las energías renovables en los países emergentes, aunque su participación en el mix energético es inferior al de países europeos. En 2012, China posee el 27% de la potencia eólica instalada mundial e India el 7%, el resto se reparte fundamentalmente entre Estados Unidos (21%), Alemania (11%), España (8%) y resto de Europa (20%).

Las previsiones de crecimiento ofrecidas por la Agencia Internacional de la Energía sobre las energías renovables sitúan su aporte en el 27% en el horizonte de 2035.

Evolución de la potencia instalada eólica y fotovoltaica (MW)

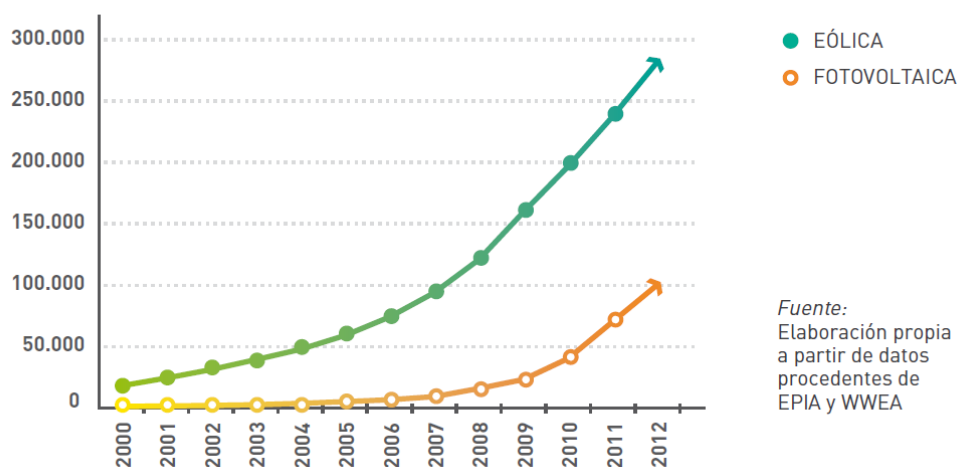


Figura 1.5 Evolución de la Potencia Eólica y Fotovoltaica Mundial Instalada [8]

Es por tanto necesario impulsar y acelerar estas actuaciones en ahorro y eficiencia energética y en el desarrollo de las energías renovables si se quiere disponer de energía duradera, segura y a un precio que permita un desarrollo económico sostenible y que al mismo tiempo permita limitar el calentamiento global a niveles aceptables para la vida en el planeta.

Panorama energético nacional y europeo

Si bien la planificación nacional actual tiene en cuenta la necesidad del cumplimiento de los compromisos europeos, enfocados en la lucha contra el cambio climático y en garantizar un suministro energético seguro, sostenible y competitivo, la legislación en materia energética, especialmente en el sector eléctrico, viene soportando continuas modificaciones en los últimos años. Dichas modificaciones, principalmente en el ámbito retributivo, están afectando entre otros conceptos a las inversiones realizadas en las instalaciones de energías renovables, introduciendo un factor de incertidumbre en la viabilidad de las ya existentes y frenando el desarrollo de futuras instalaciones que permitan lograr el cumplimiento de los objetivos marcados.

Como se recoge en la “Estrategia Energética de Andalucía 2020”, la Junta de Andalucía tiene la firme convicción de procurar para la región un sistema energético en el que las energías renovables sean la base de su mix energético. Asimismo, la aportación de Andalucía a la consecución de mayores objetivos en esta materia a nivel nacional, podría ser muy superior a la media española, atendiendo a su elevado potencial de recursos energéticos renovables. Para ello, en cualquier caso sería imprescindible disponer de un marco normativo nacional adaptado al desarrollo de la curva de aprendizaje de las diferentes tecnologías renovables (por ejemplo, para la biomasa y la tecnología solar de alta temperatura), pues se considera que el actual sistema de apoyo no es el adecuado para procurar la viabilidad necesaria a muchos de los numerosos proyectos de generación eléctrica con energías renovables con un elevado grado de madurez existentes en la región.

Asimismo, sería necesario eliminar otros obstáculos normativos (como promulgar una normativa del autoconsumo que permita obtener una rentabilidad adecuada a los proyectos presentados) y económicos (como sería una normativa fiscal incentivadora de este tipo de proyectos) existentes en la actualidad, que frenan una más rápida implementación de las energías renovables en nuestro país.

Así, el escenario energético nacional se ha ido configurando conforme a la evolución de la normativa energética. En términos de consumo de energía, el consumo de la Unión Europea equivalía al 13% de la energía consumida en el mundo en el año 2012, mientras que su población solo representa el 7% de la mundial. La población española equivale al 9% de la UE-27 y el consumo energético supone el 7,6% del total de la Unión.

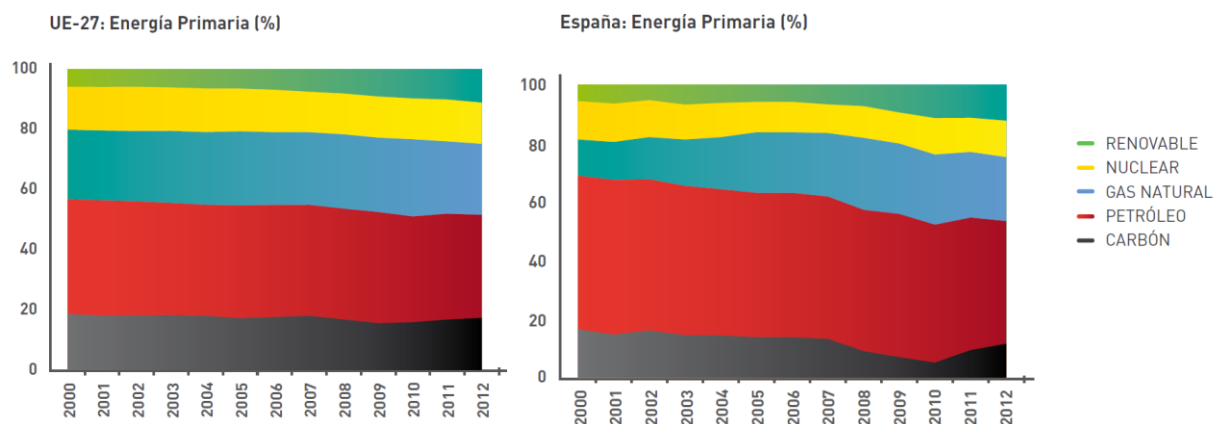


Figura 1.6 Evolución de la Energía Primaria [8]

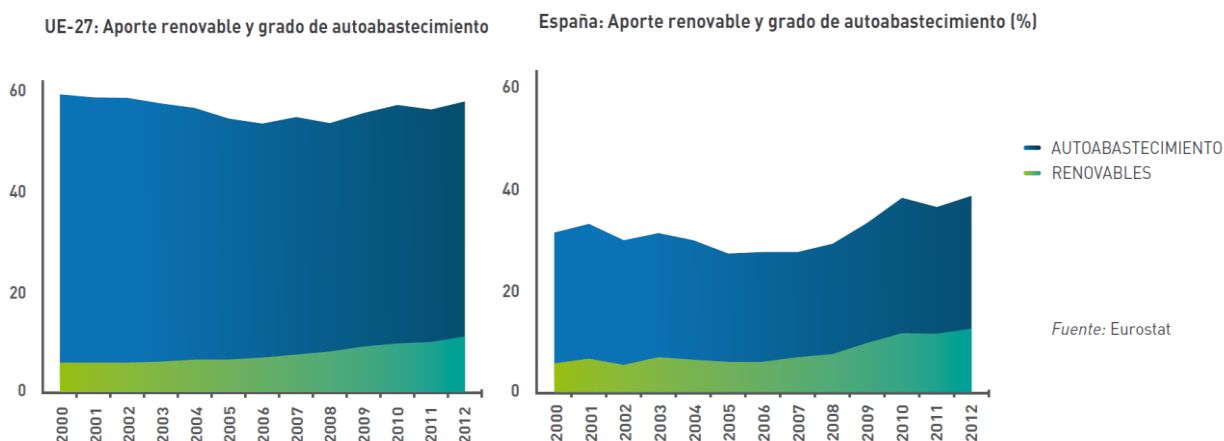
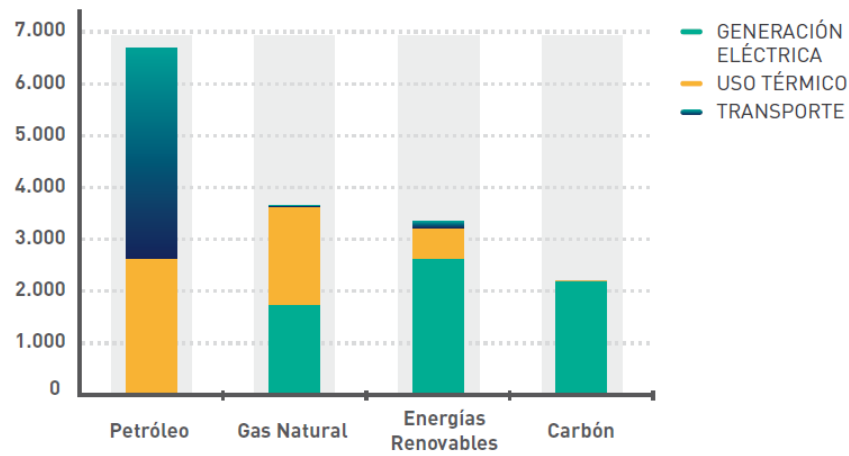


Figura 1.7 Evolución del Autoabastecimiento y las Renovables [8]

España presenta importantes diferencias respecto a Europa en cuanto a la configuración de su sistema energético: mayor dependencia energética exterior, un consumo de energía primaria per cápita inferior a la media europea, un mayor aporte de energías renovables, una mayor dependencia del petróleo y respecto a la estructura de consumo por sectores, un mayor consumo de energía en el sector transporte y un consumo menor en los sectores residencial y servicios.

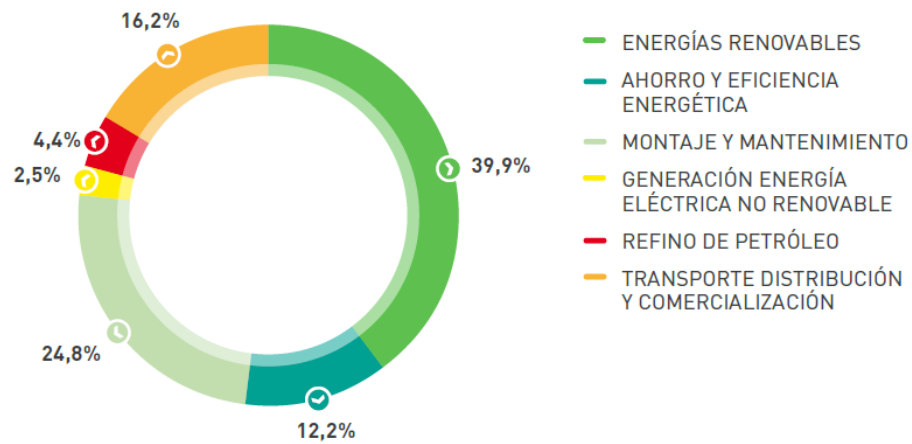
Usos de las distintas fuentes energéticas 2013 (ktep)



Fuente: Agencia Andaluza de la Energía

Figura 1.8 Uso de las Fuentes Energéticas [8]

Distribución por actividad de empleos asociados al sector energético



Fuente: Agencia Andaluza de la Energía

Figura 1.9 Distribución de Empleos en el Sector Energético [8]

La actividad del sector energético en 2013 lleva asociado en Andalucía más de 110.000 empleos anuales, de los cuales el 41% son empleos directos.

Conclusiones de la introducción

Continuar con un sistema energético basado en los combustibles fósiles no es una opción válida para Andalucía, ni para el mundo en general, pues amenaza con llevar a la región a una situación económica y medioambiental tanto más delicada cuánto más avance el siglo XXI. El agotamiento de las reservas fósiles, la necesidad que tenemos de preservarlas como fuente de materias primas y las consecuencias del cambio climático nos obligan a desprendernos de ellas como fuente energética.

A pesar de la debilidad de las economías industriales frente a recortes en los suministros fósiles, estos siguen siendo, con diferencia y sorprendentemente, la mayor fuente energética mundial.

Andalucía no es una excepción, pero además se encuentra con una limitación natural muy preocupante a la hora de satisfacer sus propias necesidades: dispone de muy escasas fuentes de energía fósil y, sin embargo, su sistema energético depende de ellos en una gran cuantía. Andalucía no produce petróleo, apenas puede cubrir el 1% del gas natural que consume y desde 2011 ya no se explotan sus minas de carbón, las cuales tenían una capacidad de producción muy limitada.

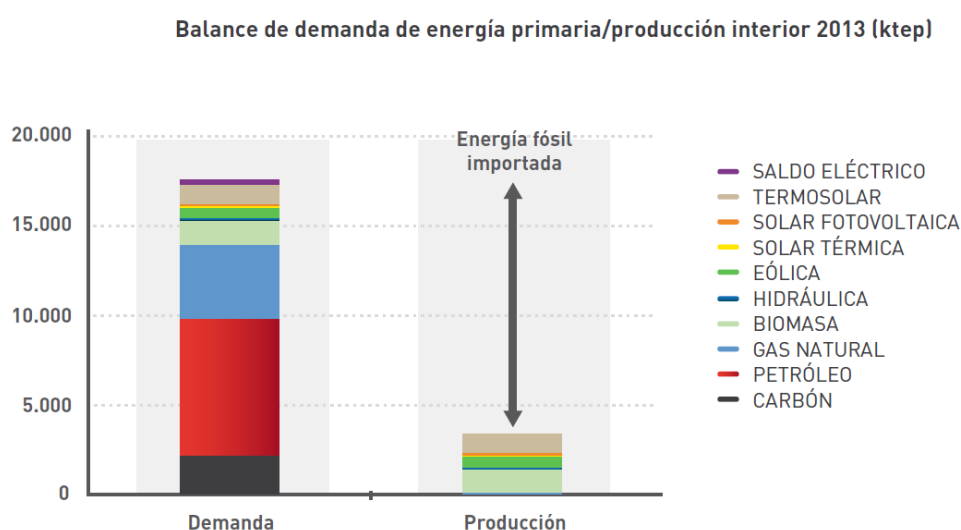


Figura 1.10 Balance Energético en Andalucía [8]

En el futuro, el aumento esperado de la población mundial hasta 9.000 millones de personas en 2050, y el crecimiento sostenido de la economía de las naciones más pobladas del planeta, China e India, que necesitarán de un suministro creciente de energía en su mayor parte fósil, dificultará aún más el acceso a los recursos energéticos. A esta lucha por los recursos se une el hecho de que la producción global de petróleo, principal fuente de energía del planeta y sin el que los medios de transporte no podrían funcionar hoy día, alcanzará de forma ineludible un pico de producción (peak-oil). La llegada del peak-oil aumentaría notablemente el coste de aprovisionamiento y provocaría que la sociedad fuera más vulnerable al riesgo de falta de suministro.

Adicionalmente, el uso intensivo de energía fósil pone bajo fuerte presión al medio ambiente y a los ecosistemas en general, e incrementa la concentración de gases de efecto invernadero que agravan el cambio climático.

Andalucía no desea contribuir de ninguna manera a esta carrera mundial por unos recursos naturales agotables cada vez más caros, escasos y contaminantes cuando, además, la región cuenta con sobrados recursos energéticos autóctonos renovables para suplir la demanda energética futura. Es técnica y económicamente posible basarse en tecnologías de generación renovable presentes hoy día. En la mayoría de los casos, el coste de las tecnologías renovables ha disminuido y los adelantos técnicos esperados podrían permitir reducirlo aún más, acelerando a necesaria transición energética.

2 OBJETIVO

2.1 Aplicación a FV en la edificación

La energía fotovoltaica urbana es una realidad hoy en día en algunos lugares del mundo, por lo que este estudio podría tener una aplicación inmediata. Además, se prevén fuertes desarrollos futuros, con lo que el estudio podría ser ampliamente utilizado también en el medio y largo plazo.

Este proyecto tiene como objetivo comparar diferentes materiales característicos de la construcción para averiguar cual puede favorecer más la integración y el aprovechamiento fotovoltaico en la edificación. Se buscan materiales con una alta capacidad de reflexión que haga que los paneles reciban, además de la radiación incidente, la reflejada por las superficies cercanas, provocando una mayor generación a un bajo coste.

Con esto, se pretende también colaborar con la implantación masiva de las energías renovables, tan necesaria en la lucha contra el cambio climático y la transición hacia un modelo energético sostenible.

2.2 Otras aplicaciones

Además de la aplicación fotovoltaica, se podrían mejorar otras aplicaciones ya existentes para los materiales reflectantes, así como aprender de la experiencia en otros campos.

2.2.1 Agricultura

Aumento del color

Se usan láminas de materiales reflectantes para aumentar el color, azúcares y tamaño de la fruta con el consiguiente incremento de su valor comercial.

Desde hace más de dos décadas, en la zona central del valle de San Joaquín, California, más de la mitad de las plantaciones de melocotón y ciruela hacen uso de láminas de materiales reflectantes entre líneas, durante el final de la campaña. En otras regiones, como la costa este estadounidense, Chile o Japón, se emplean también para otros cultivos, como manzana.

Son alternativas para mejorar la coloración de los frutos, que puedan ser de aplicación más generalizada y que eviten el uso de químicos.

Para la formación de la cianidina (precursor del pigmento rojo de los frutos), además de requerirse temperaturas entre 18° y 25°C, dependiendo del cultivo, se necesita la incidencia de radiación de 650 nm (rojo), 350 nm (ultravioleta) y 450 nm (violeta) para completar la ruta bioquímica de síntesis de pigmentos (Downs et al, 1965). Si se consigue aumentar la cantidad de luz de estas longitudes de onda que reciben los frutos, será esperable un aumento de coloración roja en su piel.



Ensayos de campo con manzanas Fuji en California, para evaluar dos materiales reflectantes: en la foto superior colocación selectiva de material reflectante entre líneas de manzano y en la foto inferior, plástico metalizado extendido entre líneas de manzano. [4]



En el valle central de California, el uso de reflectantes en melocotón y nectarina es muy habitual, justo antes de la recolección. [4]



La coloración roja conseguida gracias al material reflectante (izquierda) es evidente con respecto al control (derecha). [4]

Un problema encontrado en las primeras generaciones de materiales reflectantes fue que el film envejecía rápidamente y se rompía en multitud de pequeños trozos que quedaban sobre el terreno, difíciles de limpiar. Hoy día, diversos fabricantes suministran estos materiales, mucho más brillantes que los originales, y más resistentes, hasta el punto de que algunos agricultores utilizan el reflectante dos campañas.

Otro aspecto a tener en cuenta en la composición de los films reflectantes es su capacidad de reflexión en las distintas bandas del espectro electromagnético. Dado que todos ellos se basan en reflejar la luz ultravioleta y visible hacia la masa foliar, cada recubrimiento metálico (partículas de aluminio, aluminio laminado, otros metales...) que los diversos fabricantes emplean para su fabricación puede poseer densidades ópticas distintas, y serán más o menos eficaces en la reflexión de ciertas longitudes de onda.

Control de plagas

Los materiales reflectantes con alto poder de reflexión en el ultravioleta son de gran utilidad también en el control de plagas voladoras, en especial de vectores de virus en cultivos hortícolas. Diferentes especies presentan especial sensibilidad frente a distintas longitudes de onda, lo cual resulta especialmente útil a la hora de escoger el material reflectante a colocar sobre el terreno.

2.2.2 Edificación

Isla de calor (Refrigeración - Cool Roofs)

Los materiales que componen los espacios urbanos pueden absorber o reflejar la radiación solar e infrarroja y disipan hacia la atmósfera parte del calor acumulado. Es decir, la envolvente urbana desempeña un papel decisivo en la reducción de las ganancias térmicas y el sobrecalentamiento de una ciudad, modificando el consumo de energía y el confort térmico.

Dentro de las ciudades hay una temperatura mayor que en sus áreas periféricas, fenómeno que se conoce con el nombre de “Isla de Calor Urbana”. Es por ello, que trabajar sobre las propiedades termofísicas de los materiales que recubren fachadas, cubiertas y pavimentos es una estrategia de mitigación viable para disminuir las temperaturas de una ciudad.

La categorización de materiales de acuerdo a su Índice de Reflectancia Solar (SRI) permite seleccionar los revestimientos adecuados para disminuir las temperaturas superficiales del medio urbano y la temperatura del aire exterior, reduciendo en consecuencia el consumo energético de refrigeración en la edificación. Esta categorización permitirá recomendar aquellos materiales que se encuentran disponibles localmente y que presentan mejor desempeño térmico con el fin de alcanzar en el corto plazo la consecución de ciudades más sostenibles.

El efecto de las superficies reflectantes es mayor en verano que en invierno, ya que en invierno el sol está más bajo e incide con un ángulo menor, además de que hay más días nublados. Así, es de esperar que el aumento en la demanda de calefacción sea prácticamente despreciable para la mayoría de climas dominados por cargas de refrigeración

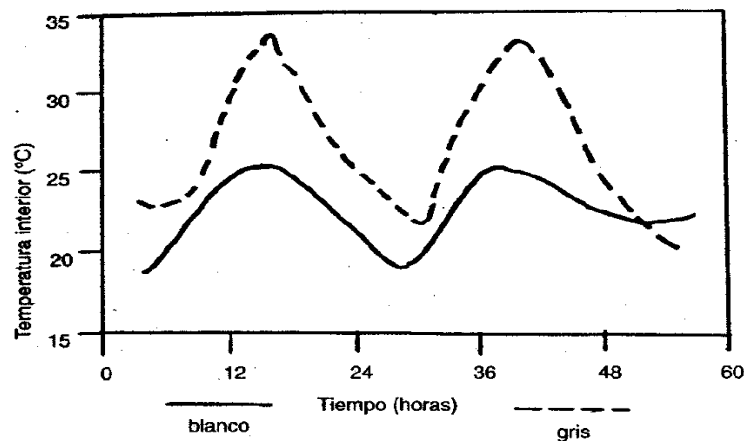


Figura 2.2.2.1 Comparación Envoltente Reflectante: Gráfica comparativa del comportamiento de un edificio con envoltente altamente reflectante frente al mismo edificio con envoltente tradicional. [6]

Aumento de la vida útil de los materiales

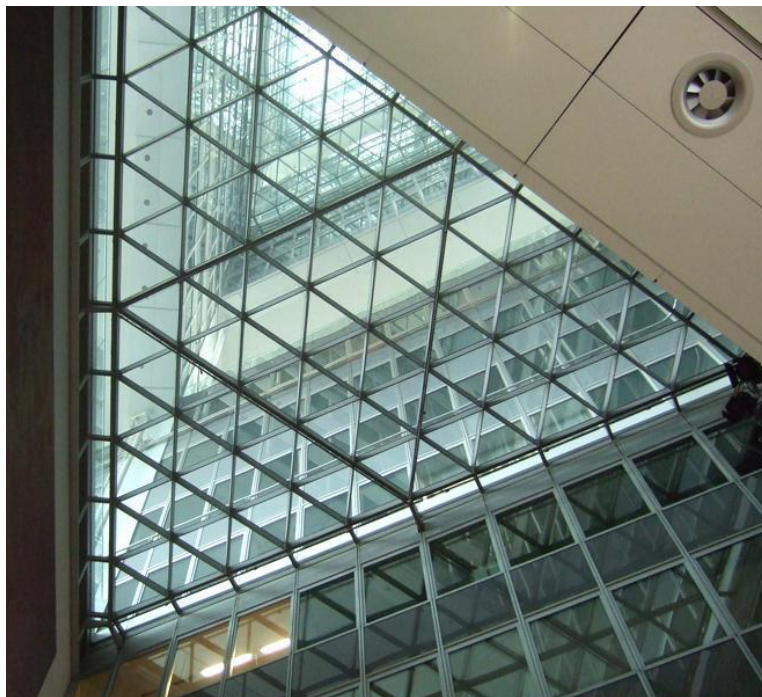
En general, un material de un color claro suele ser de un precio similar o ligeramente superior que el mismo material pero en colores oscuros convencionales. Sin embargo, el color claro refleja una mayor cantidad de luz, mientras que el oscuro la absorbe. Esto tiene el efecto de que los colores claros se ven menos afectados por los daños derivados de la radiación y las dilataciones térmicas, provocando que su durabilidad sea mayor y haya que reemplazarlo con menor frecuencia.

Sistemas de iluminación natural

Las superficies reflectantes también tienen la utilidad de dirigir la luz natural hacia el interior de los edificios, provocando un mayor confort y un ahorro en el consumo de iluminación. Existen principalmente dos formas tradicionales de conseguirlo:

- **Pacios de luces:**

Es posible transmitir luz a espacios alejados de la fachada exterior con patios de luces. Estos patios resultan más eficaces cuando aumenta la relación entre su anchura y profundidad porque se reduce el número de reflexiones, con la consiguiente disminución de la absorción de la luz. Si las paredes del patio fueran más reflectantes, se transmitiría más luz, o bien el patio podría hacerse más estrecho para la misma transmisión de luz.



Vista del patio interior de luz del Commerzbank, Frankfurt

Norman Foster [6]

- **Lamas articuladas de luz:**

El sistema de lamas de luz se basa en la utilización de materiales superficiales con gran poder reflectante, así como en la geometría empleada para reorientar la luz natural del modo más eficaz. Reflejando la luz del sol en el plano del techo, consiguen llevar la luz natural hasta profundidades superiores a las que se consiguen con ventanas o claraboyas convencionales.



Edificio de oficinas en Madrid. Junquera Arquitectos, 2007 [6]

3 ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO

3.1 Tecnologías Fotovoltaicas

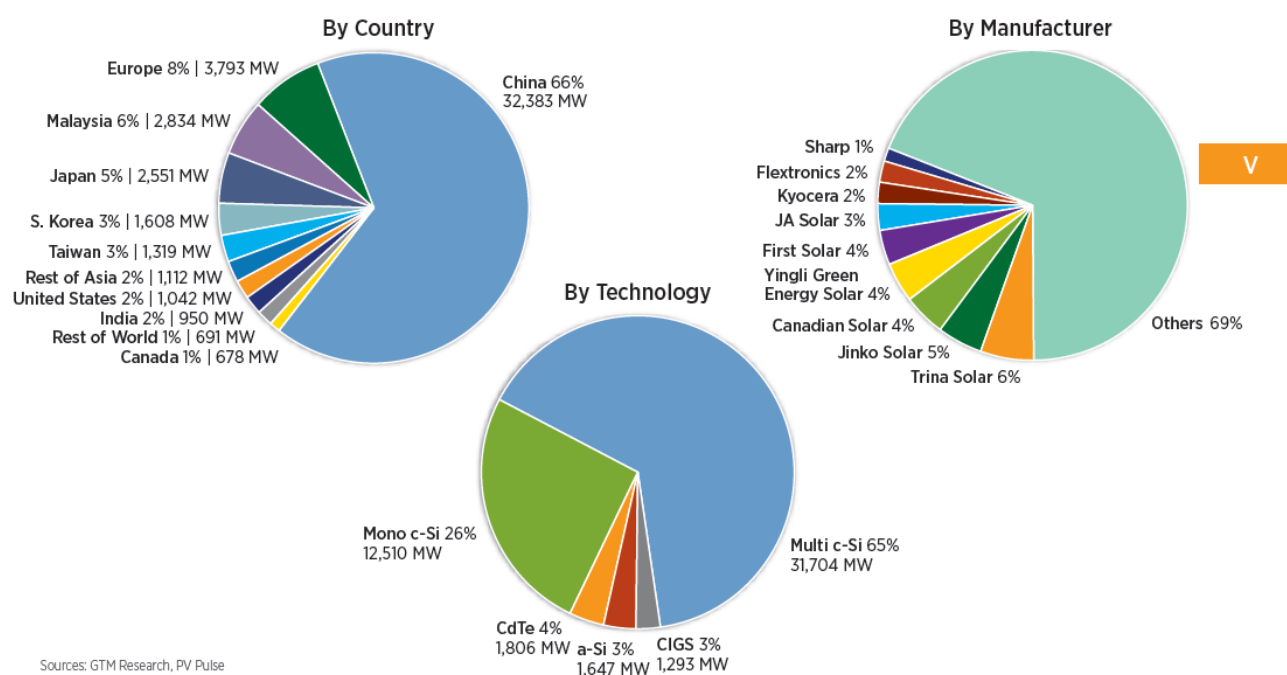
3.1.1 Más utilizadas

Se estima que la capacidad fotovoltaica acumulada global a fecha de noviembre de 2015 es de 183 GWp.

Sólo en 2014 se produjeron aproximadamente 47 GWp, dato que varía ligeramente según la fuente que se consulte.

Global Photovoltaic Manufacturing (2014)

Global Solar Module Production, 2014: 48,961 MW



Sources: GTM Research, PV Pulse
Module production is reported in MWdc.

Solar | November 2015 | 68

Figura 3.1.1.1 Fabricación Fotovoltaica [19]

Annual PV Production by Technology Worldwide (in GWp)

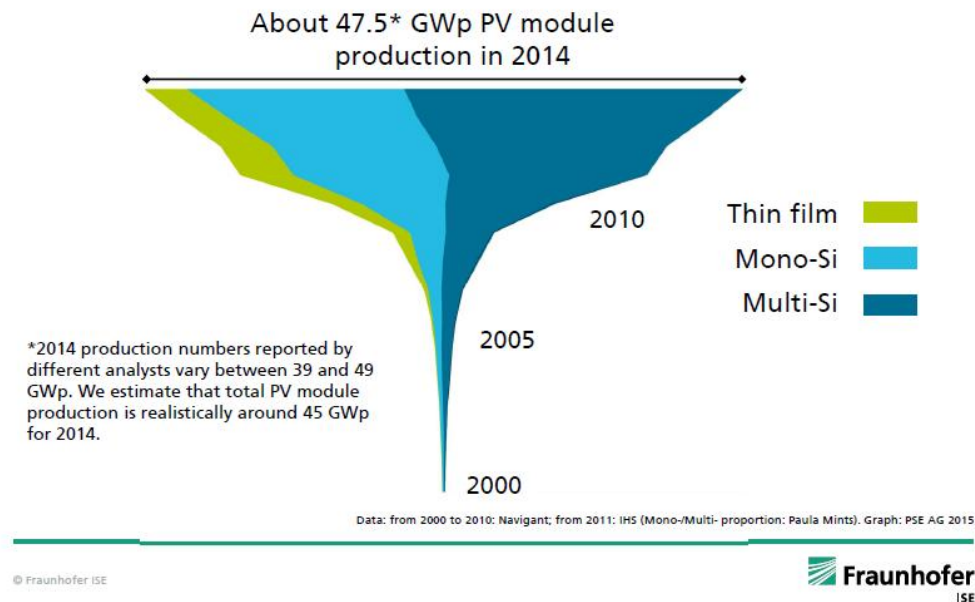
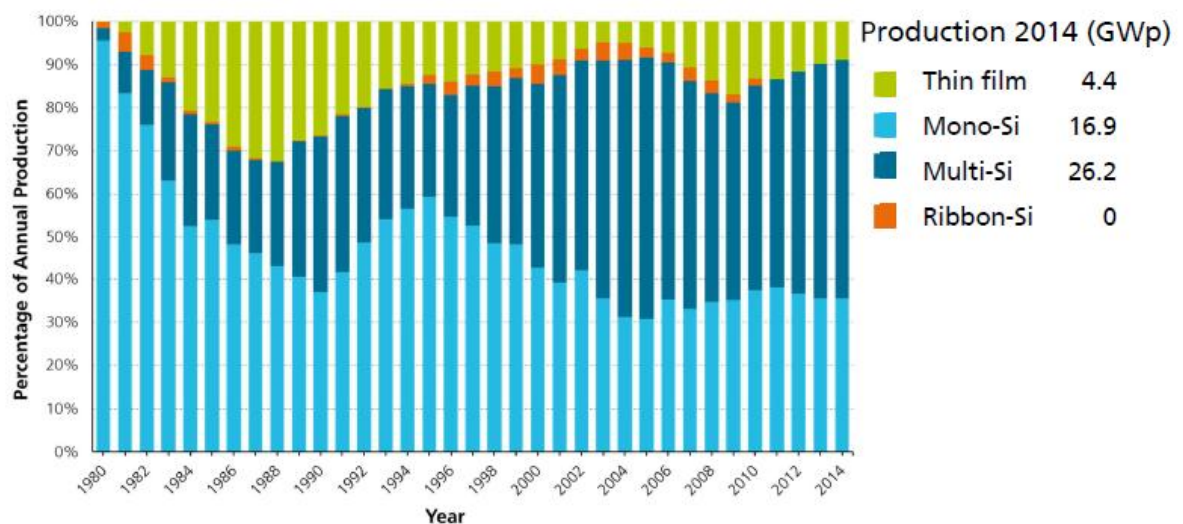


Figura 3.1.1.2 Producción Fotovoltaica I [18]

PV Production by Technology Percentage of Global Annual Production



Data: from 2000 to 2010: Navigant; from 2011: IHS (Mono-/Multi- proportion by Paula Mints). Graph: PSE AG 2015

© Fraunhofer ISE

Fraunhofer
ISE

Figura 3.1.1.3 Producción Fotovoltaica II [18]

Thin-Film Technologies: Annual Global PV Module Production

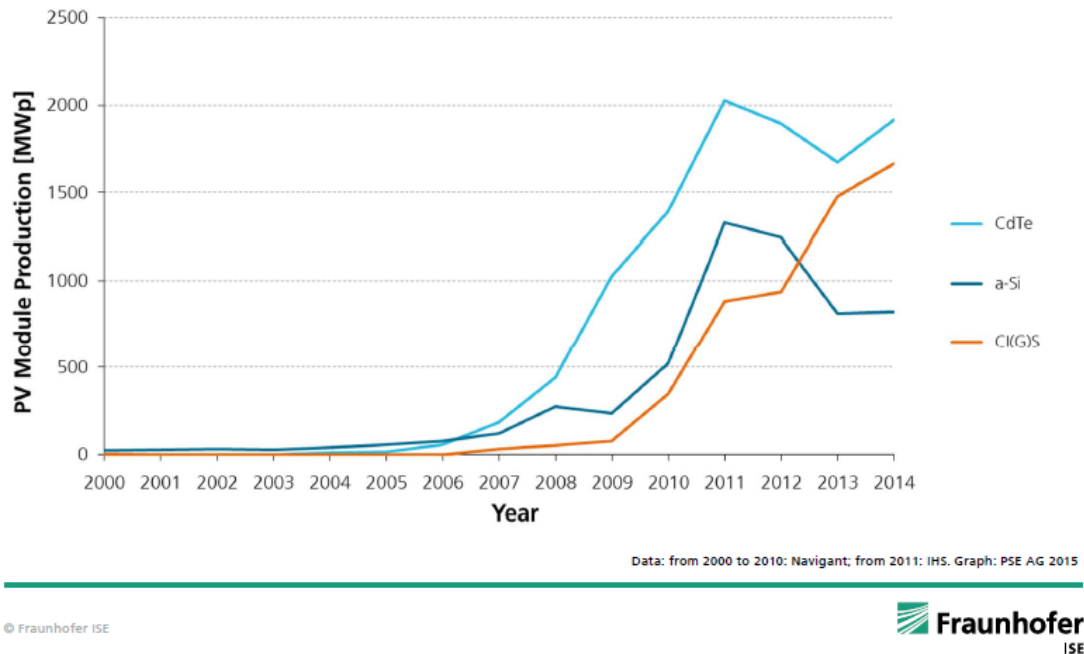


Figura 3.1.1.4 Producción FV de Lámina Delgada [18]

Podemos observar que el silicio policristalino (Multi-Si) y el silicio monocristalino (Mono-Si) son las tecnologías dominantes, seguidos de las células de película delgada. Este último grupo engloba a una gran cantidad de tecnologías diferentes pero las más extendidas en la actualidad son las de telurio de cadmio (Cd-Te), de CIGS (Copper Indium Gallium Selenide) y de silicio amorfo (a-Si).

3.1.2 Espectros de absorción

Cada tecnología fotovoltaica tiene un espectro de absorción diferente, es decir, es capaz de transformar en electricidad los fotones de una longitud de onda determinada. Por ello, necesitamos conocer los distintos casos y buscar una superficie que refleje el espectro óptimo para cada uno.

A través de una revisión bibliográfica obtendremos los espectros de absorción de las tecnologías más comunes.

Las propiedades que se utilizan para cuantificar el espectro de absorción son:

- **Eficiencia cuántica:** Es el número de electrones liberados por la célula comparado con el número de fotones incidente sobre la misma. Se mide en porcentaje (%).
- **Respuesta espectral:** Es el ratio de corriente generada por la célula en condiciones de cortocircuito frente a la potencia incidente sobre la misma. Se mide en amperios por vatio (A/W).

La banda prohibida de un semiconductor es la energía mínima requerida para excitar un electrón y hacer que este pase de la banda de valencia a la banda de conducción. Una vez que el electrón ha pasado a la banda de conducción, es libre para desplazarse por el semiconductor y generar corriente eléctrica.

Además, la excitación del electrón permite que ocurra otro proceso de conducción adicional. Al saltar de la banda de valencia a la banda de conducción, el electrón deja tras de sí un hueco. El átomo más cercano cede un electrón para ocupar ese hueco, dejando a su vez otro hueco y haciendo que se repita el proceso. El

movimiento continuo del hueco a través de la red atómica es equivalente al desplazamiento de una carga positiva. Por tanto, ambos el electrón y el hueco participan en la conducción y son denominados “portadores”.

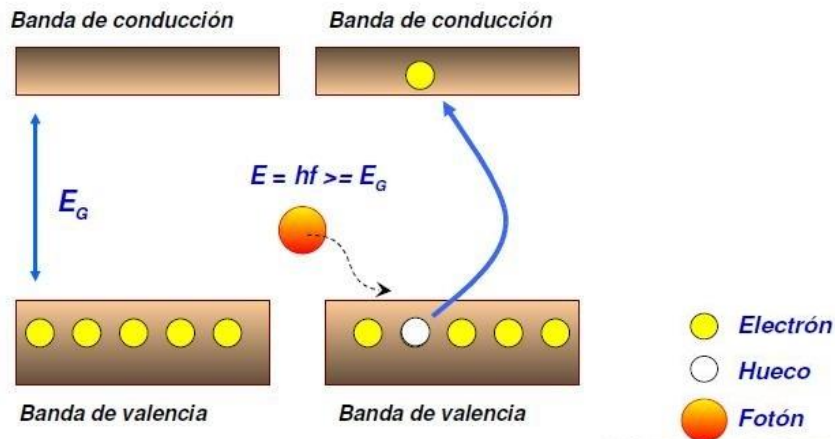


Figura 3.1.2.1 Efecto Fotovoltaico

Si la radiación incidente tiene una energía menor que la necesaria para atravesar la banda prohibida, el fotón no será capaz de producir una corriente en nuestro panel. Por eso, existe una longitud de onda característica de cada tecnología fotovoltaica a partir de la cual no es posible aprovechar la radiación.

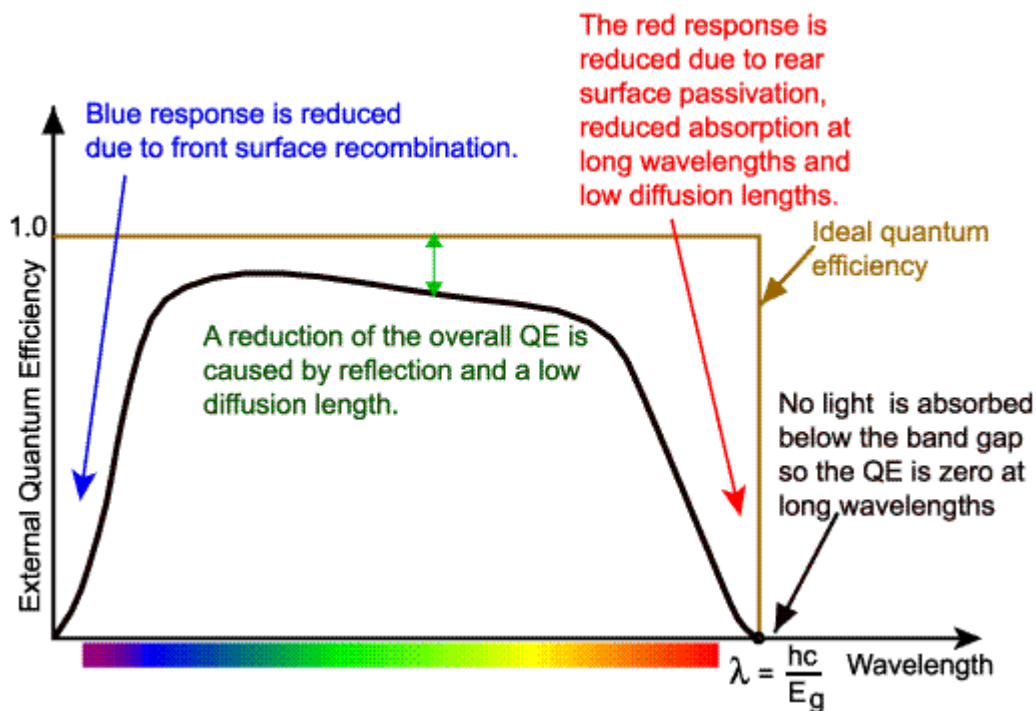


Figura 3.1.2.2 Eficiencia Cuántica de una Célula Solar de Silicio [30]

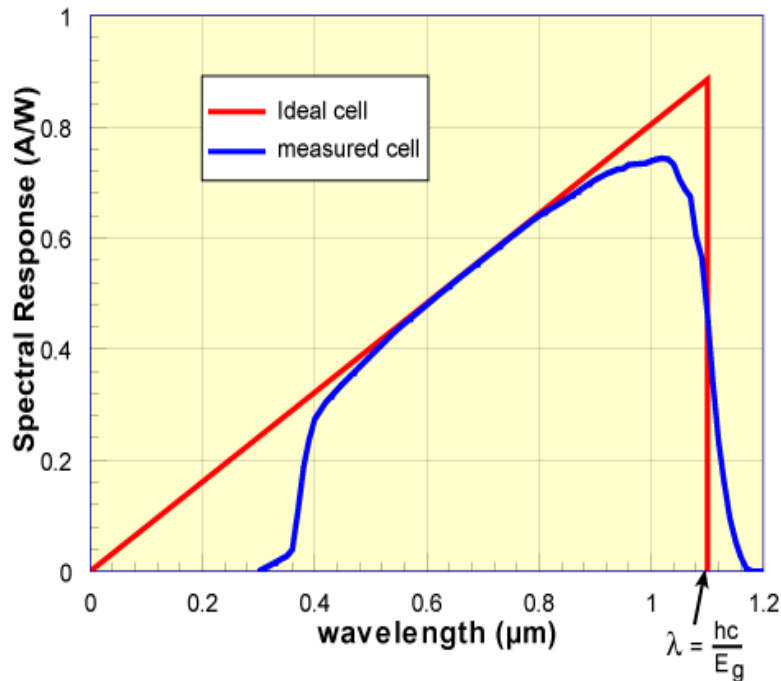


Figura 3.1.2.3 Respuesta Espectral de una Célula Solar de Silicio Bajo Vidrio [3]

A longitudes de onda cortas, por debajo de 400nm, el vidrio absorbe la mayoría de la luz y la respuesta de la célula es muy baja.

A longitudes de onda intermedias, la célula se aproxima a la ideal.

A longitudes de onda largas, la respuesta cae a cero porque la radiación tiene menos energía de la necesaria para atravesar la banda prohibida.

El silicio es un semiconductor de banda prohibida indirecta, por lo que no hay un descenso brusco en la longitud de onda correspondiente a la banda prohibida ($E_g = 1.12$ eV, $\lambda = 1107$ nm).

La respuesta espectral está limitada a largas longitudes de onda por la incapacidad del semiconductor de absorber fotones con energía inferior a la banda prohibida. Este límite es el mismo que se encuentra en las curvas de eficiencia cuántica.

Sin embargo, al contrario de la forma cuadrada de las curvas de eficiencia cuántica, la respuesta espectral decrece a pequeñas longitudes de onda. En estas frecuencias, cada fotón tiene una gran energía pero sólo libera un electrón, por tanto, el ratio de fotones frente a potencia se ve reducido. Cualquier energía por debajo o por encima de la banda prohibida no es utilizada por la célula solar sino que hace que se caliente. La incapacidad de aprovechar completamente la alta energía incidente y de absorber la baja energía representa una considerable pérdida de potencia en el dispositivo.

La respuesta espectral es importante ya que es lo que se puede medir en una célula. A partir de ella se calcula la eficiencia cuántica sustituyendo la potencia de la luz a una longitud de onda particular por el flujo de fotones a esa longitud. Esto es:

$$SR = \frac{q\lambda}{hc} QE$$

Donde:

λ = Longitud de onda de la luz (m)

q = Carga del electrón ($1.602176565 \times 10^{-19}$ C)

h = Constante de Plank ($6.62606957 \times 10^{-34}$ J x s)

c = Velocidad de la luz (2.99792458×10^8 m/s)

Apuntar que la eficiencia cuántica puede ser mayor del 100% en casos como las células de múltiple excitación, MEG por sus siglas en inglés (Multiple Excitation Generation), que consiguen que los fotones incidentes con energía mayor del doble de la banda prohibida generen dos o más pares de portadores electrón-hueco por fotón.

Tipos de eficiencia cuántica:

- **Eficiencia Cuántica Externa:** EQE por sus siglas en inglés, es el ratio entre el número de portadores de carga generados por la célula solar y el número de fotones incidentes de una cierta energía.
- **Eficiencia Cuántica Interna:** IQE, por sus siglas en inglés, es el ratio entre el número de portadores de carga generados por la célula solar y el número de fotones absorbidos de una cierta energía. IQE siempre es mayor que EQE, ya que no tiene en cuenta los fotones reflejados ni los transmitidos por la célula.

Una IQE baja indica que la capa activa de la célula es incapaz de hacer buen uso de los fotones que absorbe, es decir, que genera calor en lugar de electricidad. Para cuantificar la IQE, primero se mide la EQE del dispositivo, después se miden reflexión y transmisión, y se combinan los datos para obtener IQE.

$$EQE = \frac{\text{electrons/sec}}{\text{photons/sec}} = \frac{\text{current}/(\text{charge of one electron})}{(\text{total power of photons})/(\text{energy of one photon})}$$

$$IQE = \frac{\text{electrons/sec}}{\text{absorbed photons/sec}} = \frac{EQE}{1 - \text{Reflection} - \text{Transmission}}$$

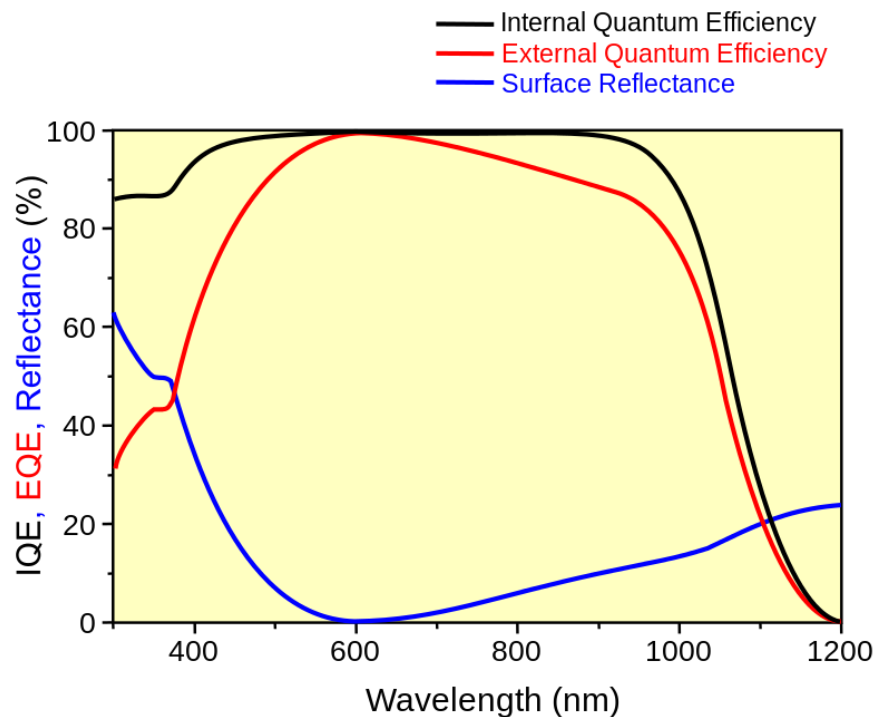


Figura 3.1.2.4 Eficiencia Cuántica Interna y Externa [23]

La siguiente figura muestra las respuestas espectrales típicas de varias tecnologías fotovoltaicas:

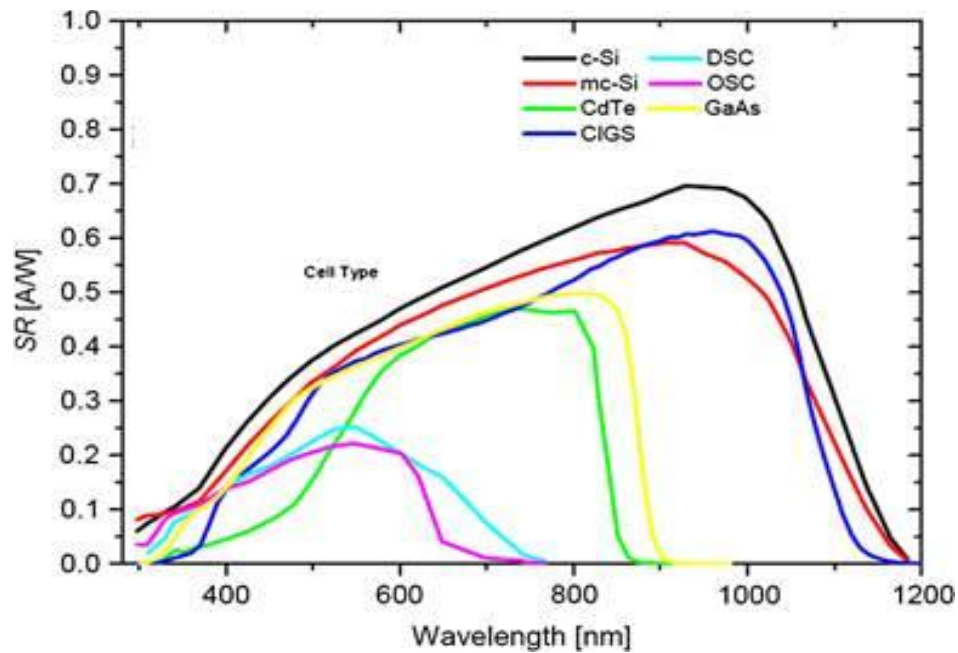


Figura 3.1.2.5 Respuesta Espectral por Tecnología I [26] [31]

Si acudimos a otras fuentes, encontramos gráficas muy similares. El silicio monocristalino tiene una respuesta espectral más alta que el policristalino que, a su vez está por encima del silicio amorfo. Además el máximo de la gráfica está más desplazado hacia longitudes de onda larga en el silicio monocristalino, después en el policristalino y finalmente en el amorfo, que alcanza su mejor respuesta ante longitudes de onda más energéticas.

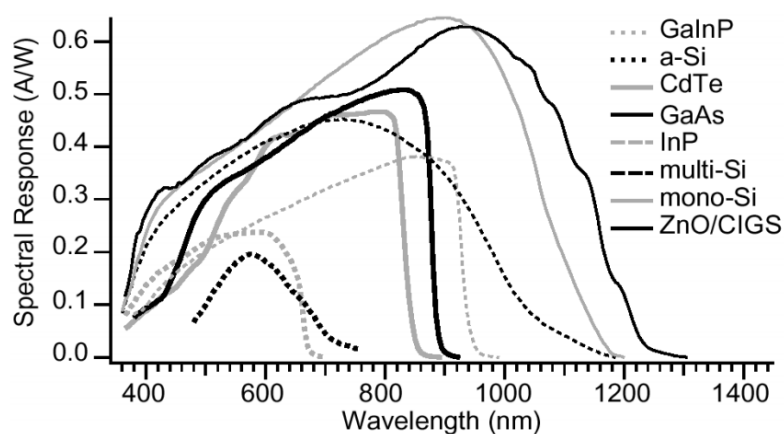


Figura 3.1.2.6 Respuesta Espectral por Tecnología II [22]

En la siguiente imagen tenemos la respuesta espectral relativa, que nos permite apreciar en qué longitud de onda se alcanza el máximo rendimiento para cada tecnología y comparar este punto con el espectro solar, visible en el fondo más tenuemente.

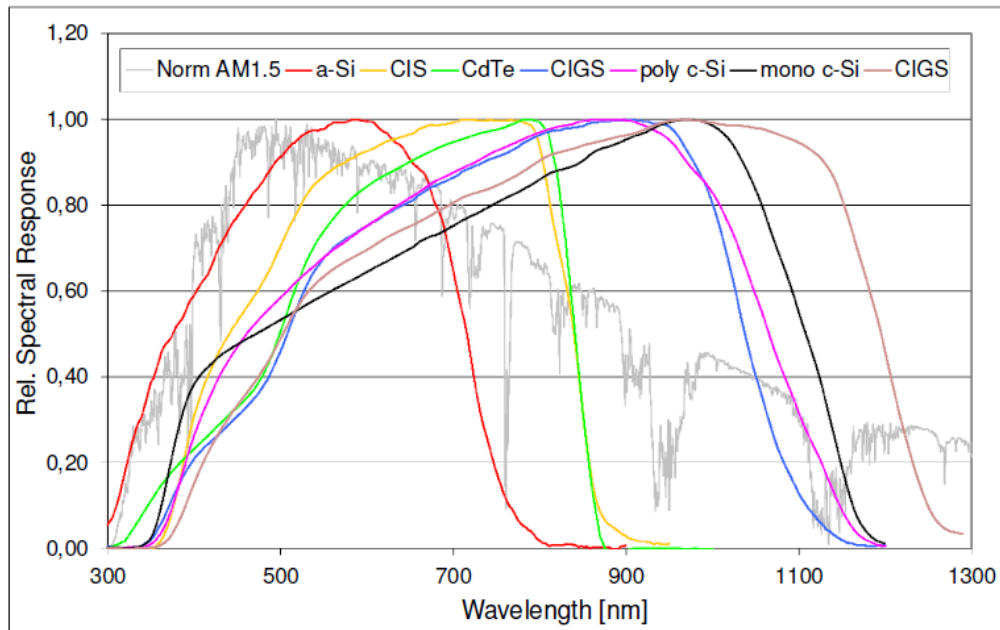


Figure 2 Rel. spectral response signal of different PV-module technologies in comparison with IEC 60904-3 spectrum

Figura 3.1.2.7 Respuesta Espectral Relativa [21]

Con respecto a este tema, se está trabajando en el desarrollo de células solares multicapa que, uniendo varios materiales fotovoltaicos diferentes, sean capaces de obtener un buen rendimiento en una mayor banda del espectro.

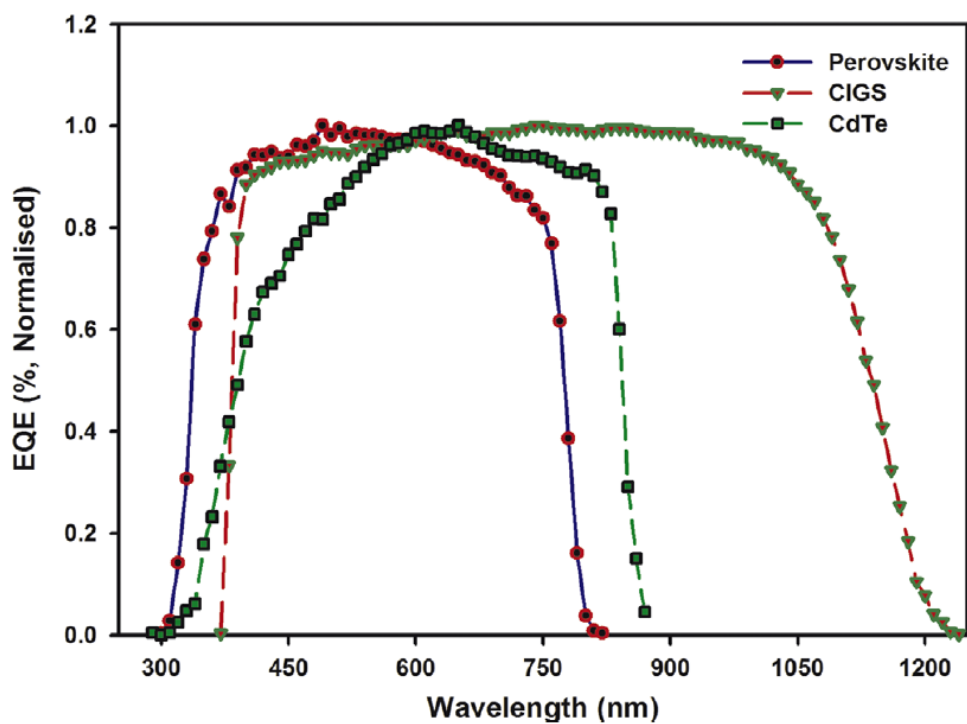


Figura 3.1.1.8 Células Multicapa [20]

3.2 Radiación

Los módulos fotovoltaicos son caracterizados por su respuesta a una luz con un espectro de referencia, el cual se encuentra recogido en la norma ASTM G-173-03. Esta distribución de potencia como función de la longitud de onda (vatios por metro cuadrado por nanómetro) representa una referencia para evaluar materiales fotovoltaicos. Las condiciones seleccionadas son una media de los estados de EEUU durante un período de un año. En esta norma se definen dos irradiancias espectrales solares terrestres:

- **Global:** Sobre plano inclinado 37° , orientado al sur, AM 1.5 y atmósfera estándar de EEUU de 1976 son algunas de sus condiciones.
- **Normal directa:** Es la componente directa que contribuye a la total global.

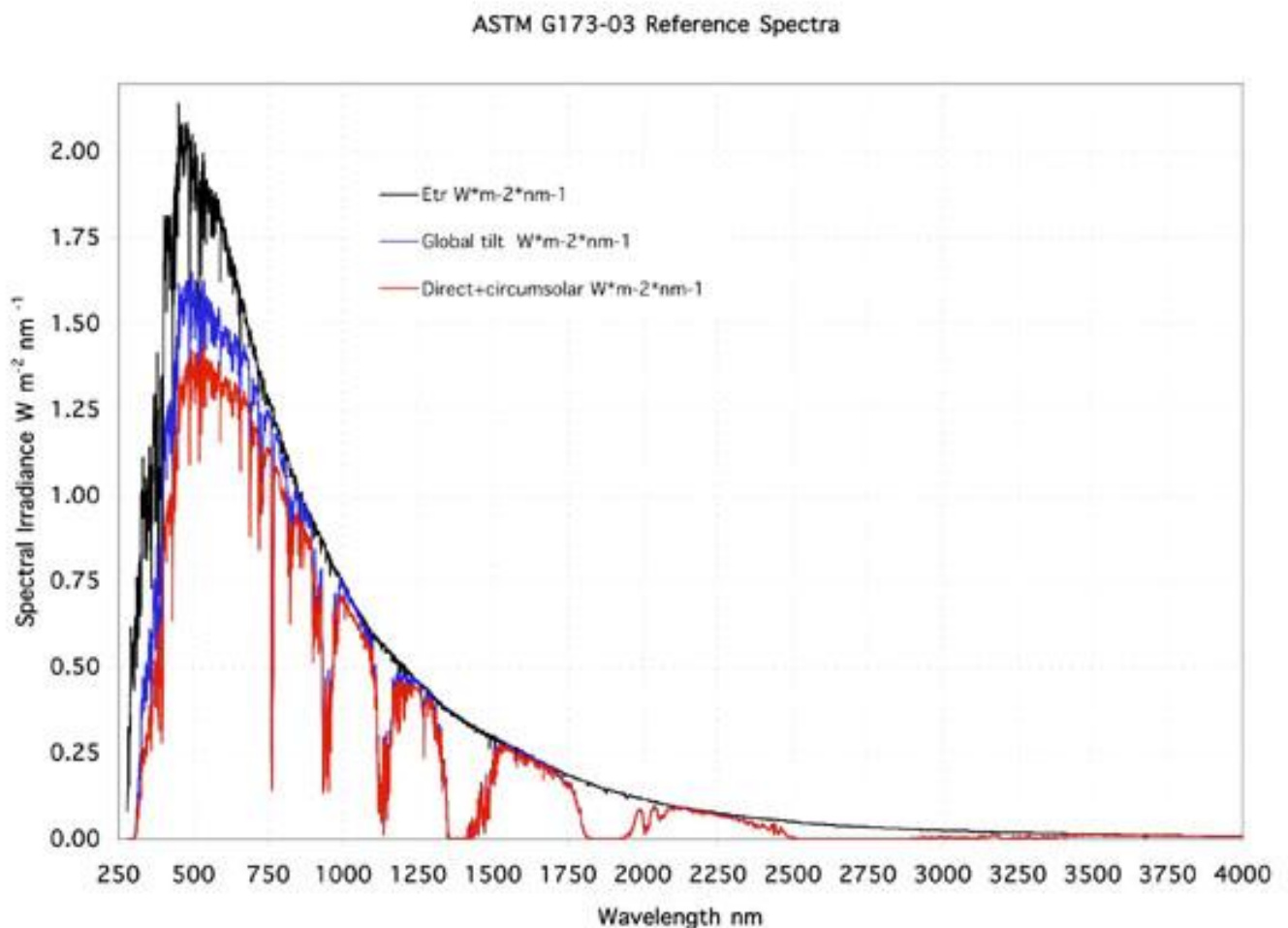


Figura 3.2.1 Espectro Solar [30]

En el caso de la aplicación fotovoltaica, nos interesa conocer en profundidad la curva de la irradiancia global, pues es la aprovechable por los paneles.

De la siguiente tabla podemos tomar los datos numéricos de una simplificación de la función. En la primera y quinta columna se muestra la longitud de onda; en la segunda y sexta la irradiancia solar global ($\text{W/m}^2/\mu\text{m}$); en la tercera y séptima la irradiancia global integrada (W/m^2) y en la cuarta y octava el porcentaje de irradiancia global integrada (%).

Table 3. Global AM1.5 spectral irradiance data sets for 0.2 ground albedo, and 37°-tilted surface (1.42 cm H_2O , 0.34 cm O_3 , $\tau = 0.27$)

λ^a (μm)	E_λ^b ($\text{W/m}^2/\mu\text{m}$)	$E_{0-\lambda}^c$ (W/m^2)	$\frac{E_{0-\lambda}}{E_{0-\infty}}^d$	λ^a (μm)	E_λ^b ($\text{W/m}^2/\mu\text{m}$)	$E_{0-\lambda}^c$ (W/m^2)	$\frac{E_{0-\lambda}}{E_{0-\infty}}^d$
0.3050	9.2	0.05	0.0000	0.8800	899.4	647.34	0.6803
0.3100	40.8	0.25	0.0003	0.9050	721.4	659.96	0.6936
0.3150	103.9	1.77	0.0008	0.9150	643.3	666.39	0.7003
0.3200	174.4	1.64	0.0017	0.9250	565.3	671.38	0.7056
0.3250	237.9	2.83	0.0030	0.9300	389.0	673.72	0.7080
0.3300	381.0	4.74	0.0050	0.9370	248.9	675.96	0.7104
0.3350	376.0	6.62	0.0070	0.9480	302.2	680.19	0.7148
0.3400	419.5	8.71	0.0092	0.9650	507.7	688.31	0.7234
0.3450	423.0	10.83	0.0114	0.9800	623.0	697.19	0.7327
0.3500	466.2	14.32	0.0151	0.9935	719.7	718.78	0.7554
0.3600	501.4	19.34	0.0203	1.0400	665.5	744.24	0.7821
0.3700	642.1	25.76	0.0271	1.0700	614.4	762.67	0.8015
0.3800	686.7	32.63	0.0343	1.1000	397.6	772.61	0.8120
0.3900	694.6	39.57	0.0416	1.1200	105.0	774.18	0.8136
0.4000	976.4	49.34	0.0518	1.1300	182.2	775.73	0.8152
0.4100	1116.2	60.50	0.0636	1.1370	127.4	777.71	0.8173
0.4200	1141.1	71.91	0.0756	1.1610	326.7	784.73	0.8247
0.4300	1033.0	82.24	0.0864	1.1800	443.3	793.38	0.8338
0.4400	1254.8	94.79	0.0996	1.2000	408.2	804.60	0.8456
0.4500	1470.7	109.49	0.1151	1.2350	463.1	825.44	0.8675
0.4600	1541.6	124.91	0.1313	1.2900	398.1	842.36	0.8853
0.4700	1523.7	140.15	0.1473	1.3200	241.1	849.59	0.8929
0.4800	1569.3	155.84	0.1638	1.3500	31.3	850.77	0.8941
0.4900	1483.4	170.67	0.1794	1.3950	1.5	850.84	0.8942
0.5000	1492.6	185.60	0.1951	1.4425	53.7	852.65	0.8961
0.5100	1529.0	200.89	0.2111	1.4625	101.3	854.40	0.8979
0.5200	1431.1	215.20	0.2262	1.4770	101.7	856.15	0.8998
0.5300	1515.4	230.35	0.2421	1.4970	175.5	859.92	0.9037
0.5400	1494.5	245.30	0.2578	1.5200	253.1	865.24	0.9093
0.5500	1504.9	267.87	0.2815	1.5390	264.3	870.26	0.9146
0.5700	1447.1	296.82	0.3119	1.5580	265.0	875.43	0.9200
0.5900	1344.9	323.71	0.3402	1.5780	235.7	879.44	0.9242
0.6100	1431.5	352.34	0.3703	1.5920	238.4	883.25	0.9282
0.6300	1382.1	379.98	0.3993	1.6100	220.4	887.44	0.9326
0.6500	1368.4	407.35	0.4281	1.6300	235.6	891.68	0.9371
0.6700	1341.8	434.19	0.4563	1.6460	226.3	897.11	0.9428
0.6900	1089.0	455.97	0.4792	1.6780	212.5	907.10	0.9533
0.7100	1269.0	473.74	0.4979	1.7400	165.3	917.19	0.9639
0.7180	973.7	480.75	0.5052	1.8000	29.6	918.96	0.9658
0.7244	1005.4	491.81	0.5169	1.8600	1.9	919.07	0.9659
0.7400	1167.3	508.21	0.5341	1.9200	1.2	919.13	0.9660
0.7525	1150.6	518.27	0.5447	1.9600	20.4	919.80	0.9666
0.7575	1132.9	523.94	0.5506	1.9850	87.8	921.77	0.9687
0.7625	619.8	527.04	0.5539	2.0050	25.8	922.41	0.9694
0.7675	993.3	535.73	0.5630	2.0350	95.9	925.29	0.9724
0.7800	1090.1	553.44	0.5816	2.0650	58.2	927.18	0.9744
0.8000	1042.4	572.21	0.6014	2.1000	85.9	930.75	0.9782
0.8160	818.4	581.90	0.6115	2.1480	79.2	934.63	0.9822
0.8237	756.5	587.77	0.6177	2.1980	68.9	938.83	0.9867
0.8315	883.2	594.96	0.6253	2.2700	67.7	944.31	0.9924
0.8400	925.1	608.15	0.6391	2.3600	59.8	949.69	0.9981
0.8600	943.4	627.01	0.6590	2.4500	20.4	951.53	1.0000

^a λ = Wavelength.

^b E_λ = Direct normal spectral irradiance averaged over 20 nm^{-1} centered at λ .

^c $E_{0-\lambda}$ = Integrated global irradiance in the wavelength range 0 to λ .

^d $E_{0-\infty}$ = Integrated global irradiance over the entire spectrum.

Tabla 3.2.1 Irradiancia Solar Global Espectral [28]

Para una mejor visualización de los datos se muestran en forma de gráfico:

Global AM1.5 spectral irradiance data sets for 0.2 ground albedo and 37°-tilted surface (1.42 cm H₂O, 0.34 cm O₃, $\tau = 0.27$)

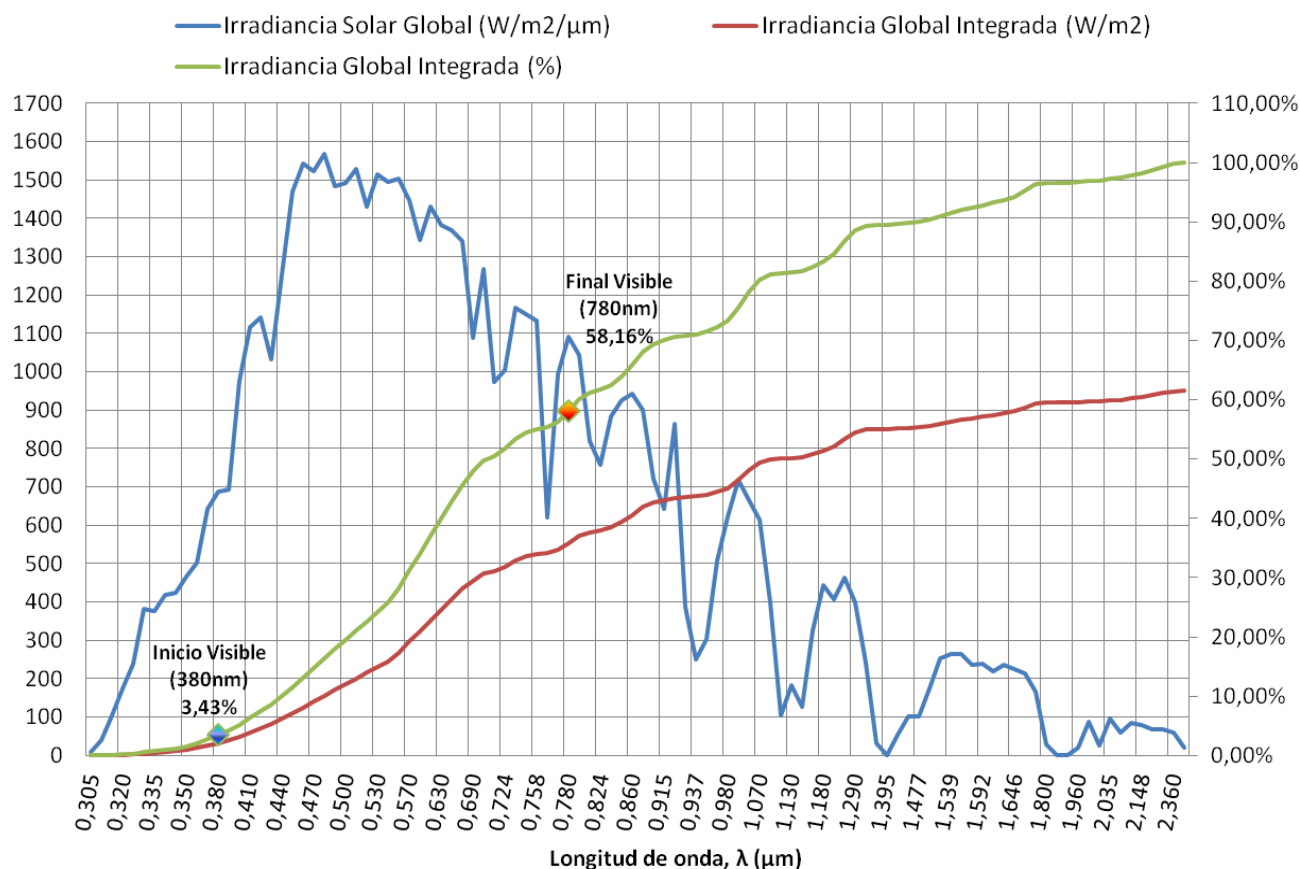


Figura 3.2.2 Espectro Solar Global Integrado [33]

Normalmente se considera que la radiación visible comienza en la longitud de onda 380 nm, correspondiente al color violeta, y termina en 780 nm, correspondiente al color rojo, y conforma el 54.73% de la radiación total que alcanza la superficie terrestre.

La radiación ultravioleta que nos llega del Sol, con longitud de onda inferior a 380 nm es el 3.43% de la potencia total. Está compuesta por fotones muy energéticos, capaces de liberar electrones a la banda de conducción, pues poseen una energía mayor que la banda prohibida. Este exceso de energía contenido en estos fotones es el responsable de calentar la célula fotovoltaica.

La radiación infrarroja, con longitud de onda superior a 780 nm, constituye el 41.84% de radiación procedente del Sol. Los fotones que la componen son menos energéticos, llegando a ser en gran proporción, incapaces de liberar un electrón del semiconductor, por lo que no son útiles en la generación de corriente. Aquellos fotones con energía menor que la banda prohibida también son culpables de aumentar la temperatura de la célula, pues disipan su energía en forma de calor.

3.3 Temperatura

La temperatura a la que se encuentra el panel afecta a su funcionamiento negativamente. El aumento de la temperatura hace que los paneles pierdan rendimiento y se reduzca la potencia que pueden generar. Principalmente influye sobre los siguientes factores:

- $\frac{\partial P_{max}}{\partial T_p} \sim -0.5 \frac{\%}{^\circ C}$: Por cada grado que aumenta la temperatura del panel (T_p), se reduce del orden de un 0.5% la potencia máxima (P_{max}) que este es capaz de generar.
- $\frac{\partial I_{sc}}{\partial T_p} \sim 0.04 \frac{\%}{^\circ C}$: Por cada grado que aumenta la temperatura del panel (T_p), aumenta aproximadamente un 0.04% la intensidad de cortocircuito (I_{sc}) del módulo.
- $\frac{\partial V_{pmax}}{\partial T_p} \sim -0.4 \frac{\%}{^\circ C}$: Por cada grado que aumenta la temperatura del panel (T_p), se reduce aproximadamente un 0.4% la tensión de máxima potencia (V_{pmax}) del módulo.
- $\frac{\partial V_{oc}}{\partial T_p} \sim -0.3 \frac{\%}{^\circ C}$: Por cada grado que aumenta la temperatura del panel (T_p), se reduce aproximadamente un 0.3% la tensión de circuito abierto (V_{oc}) del módulo.

Estos datos se pueden encontrar en la ficha técnica de los diferentes modelos de células fotovoltaicas.

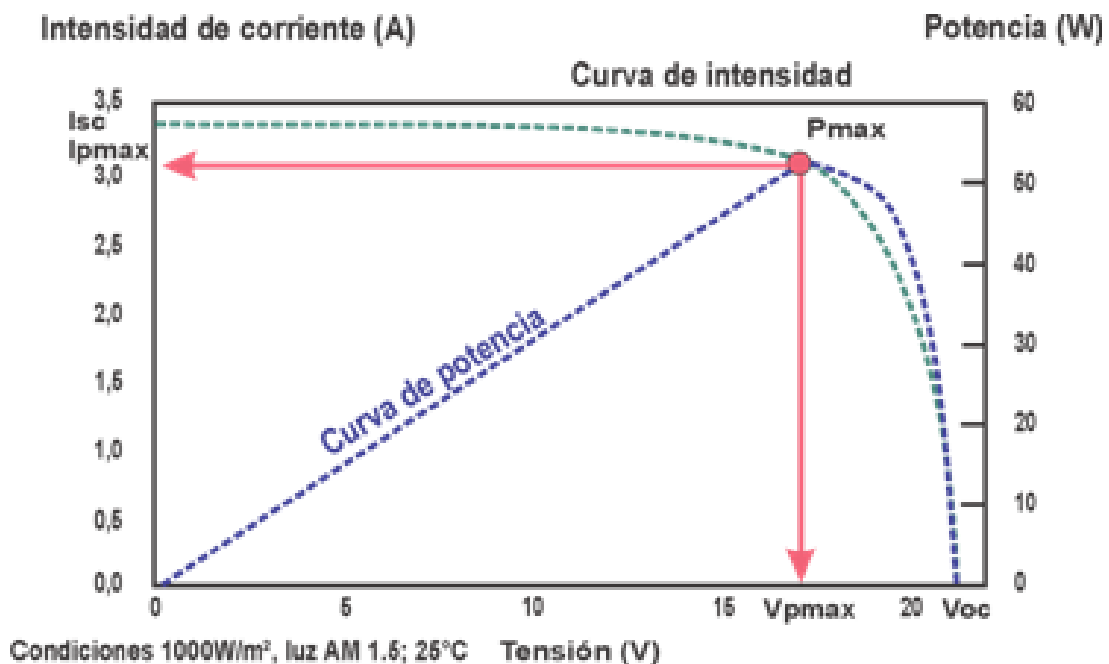


Figura 3.3.1 Curva I-V

A continuación podemos ver gráficamente cómo afecta la temperatura a los diferentes parámetros de la curva I-V de las células:

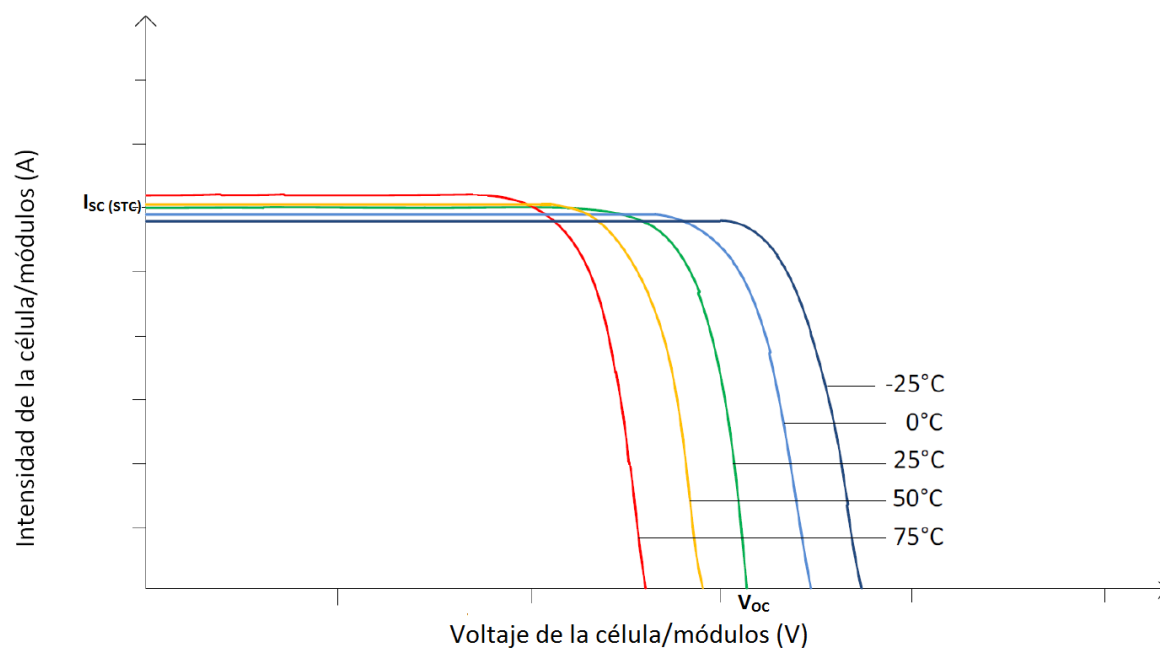


Figura 3.3.2 Efecto de la Temperatura I

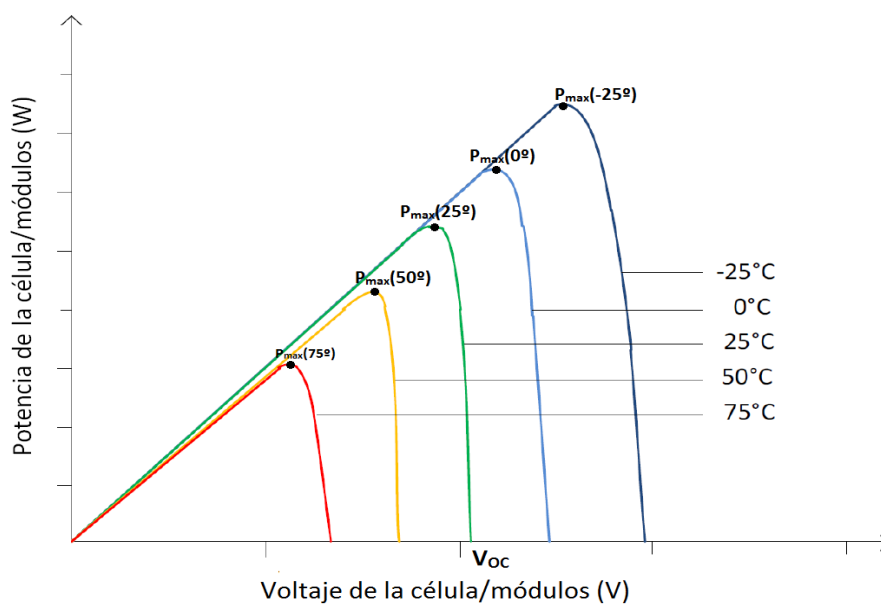


Figura 3.3.3 Efecto de la Temperatura II

La temperatura del panel es una función que depende de la irradiancia, la temperatura ambiente, la velocidad y dirección del viento, los materiales y el entorno. Cuanto mayor es la cantidad de luz que llega al panel, mayor es la temperatura que este alcanza. Una manera común aproximar la temperatura del panel según la irradiancia viene dado por la siguiente ecuación:

$$T_p [^{\circ}\text{C}] = T_a [^{\circ}\text{C}] + \frac{T_{ONC} [^{\circ}\text{C}] - 20}{800} \times I [W/m^2]$$

Donde,

- $T_p [^{\circ}\text{C}]$: Temperatura del panel
- $T_a [^{\circ}\text{C}]$: Temperatura ambiente
- $T_{ONC} [^{\circ}\text{C}]$: Temperatura Operativa Nominal de la Célula. Es aquella que el panel alcanza cuando está en unas condiciones fijas de $800 W/m^2$ de irradiancia, 20°C de temperatura ambiente y una velocidad de viento perpendicular de $1 m/s$. Es una característica que se puede encontrar en la ficha técnica de cada módulo
- $I [W/m^2]$: Irradiancia solar incidente

Por otra parte, es aceptable hacer la estimación de que la irradiancia incidente es directamente proporcional a la potencia máxima del panel. Es decir, el doble de irradiancia provoca el doble de potencia máxima aproximadamente. Además, la tensión de circuito abierto aumenta ligeramente.

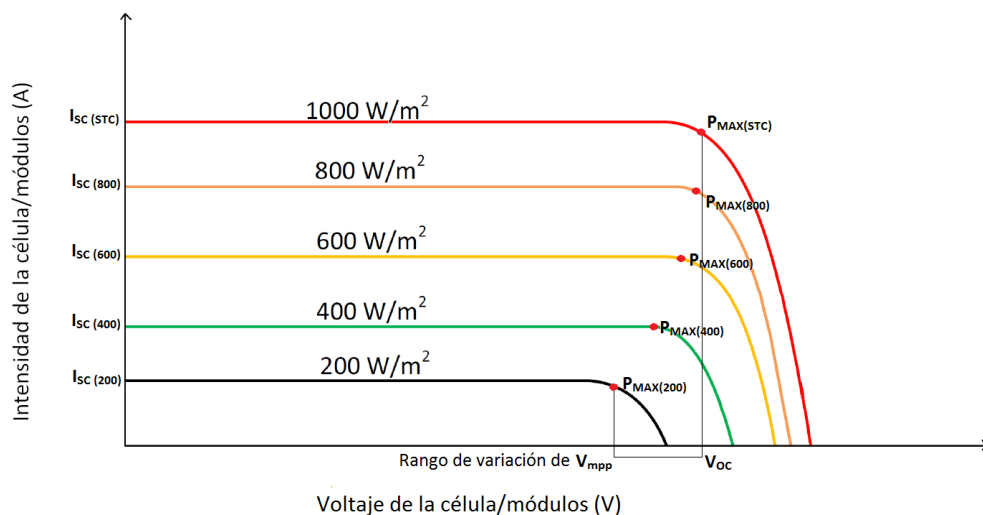
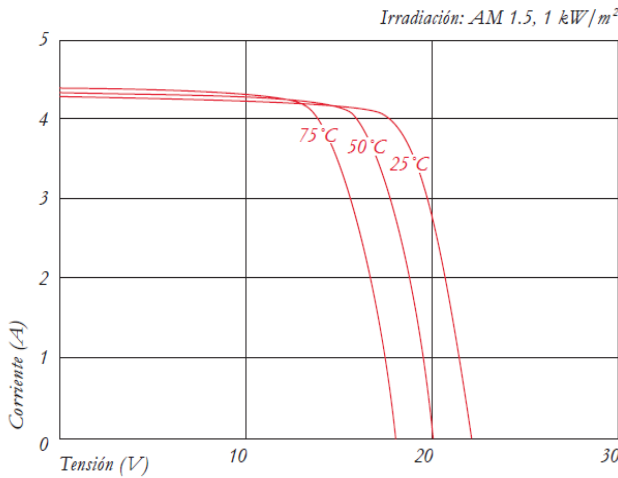


Figura 3.3.4 Efecto de la Irradiación

Aquí podemos ver la ficha técnica de un módulo real, el Kyocera KD70SX-1P:

CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

Curva característica de tensión y corriente a distintas temperaturas de la célula



Curva característica de tensión y corriente con distinta irradiación

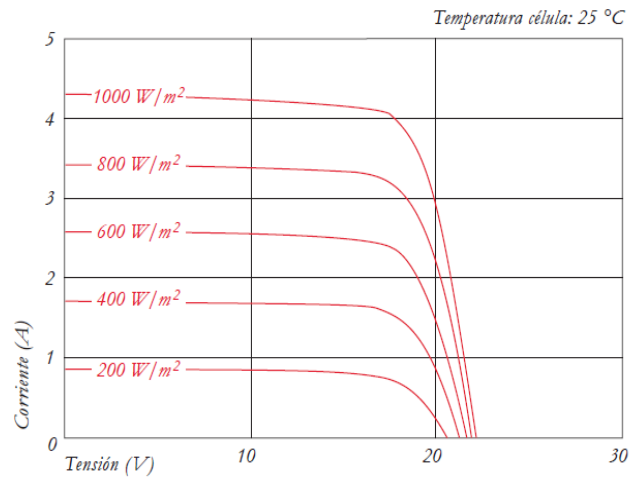


Figura 3.3.5 Ficha Técnica Panel [17]

Se deduce que el aumento de la radiación incidente sobre nuestro panel fotovoltaico tiene dos efectos contrapuestos: por un lado aumenta proporcionalmente la potencia de trabajo, pero también aumenta la temperatura, que tiene el efecto secundario de reducir esta misma potencia. Debemos estudiar hasta qué punto es conveniente aumentar la concentración en las células manteniendo una situación favorable. Para esto debemos realizar los siguientes cálculos, utilizando como datos los obtenidos de la ficha técnica del modelo Kyocera KD70SX-1P nombrado previamente:

Se toman los siguientes datos:

- $\frac{\partial P_{max}}{\partial T_p} = -0.45 \frac{\%}{^{\circ}C}$
- $\frac{\partial I_{sc}}{\partial T_p} = 0.06 \frac{\%}{^{\circ}C}$
- $\frac{\partial V_{oc}}{\partial T_p} = -0.36 \frac{\%}{^{\circ}C}$
- $T_{ONC} = 49^{\circ}C$
- $P_{max \text{ en STC }} \left(I = 1000 \frac{W}{m^2}, T_p = 25^{\circ}C \right) = 70W$
- $T_p [^{\circ}C] = T_a [^{\circ}C] + \frac{T_{ONC} [^{\circ}C] - 20}{800} \times I [W/m^2]$

Modificación de la Pmax debido al cambio de irradiancia (I): Estimamos que la Pmax es directamente proporcional a la I.

$$P_1 = \frac{P_{max \text{ en STC }}}{1000} \times I_1$$

Modificación de la Pmax a causa del cambio en la temperatura del panel (Tp):

$$\frac{\partial P_{max}}{\partial T_p} \left[\frac{\%}{^{\circ}C} \right] \times \partial T_p [^{\circ}C] = \partial P_{max} [\%]$$

La potencia máxima una vez afectada por la irradiancia y la temperatura quedaría:

$$P_{max1} [W] = P_1 [W] \times \partial P_{max} [\%]$$

Gráficamente podemos observar que hay un punto a partir del cual no interesa seguir concentrando radiación sobre el panel, ya que el descenso de la potencia debido al calentamiento es superior al incremento debido a la mayor cantidad de luz solar.

En nuestro caso, este punto se alcanza cuando concentramos una potencia radiante de 3100 W/m^2 sobre el panel, que estaría a una temperatura de 137°C y generando una potencia aproximada de 107 W .

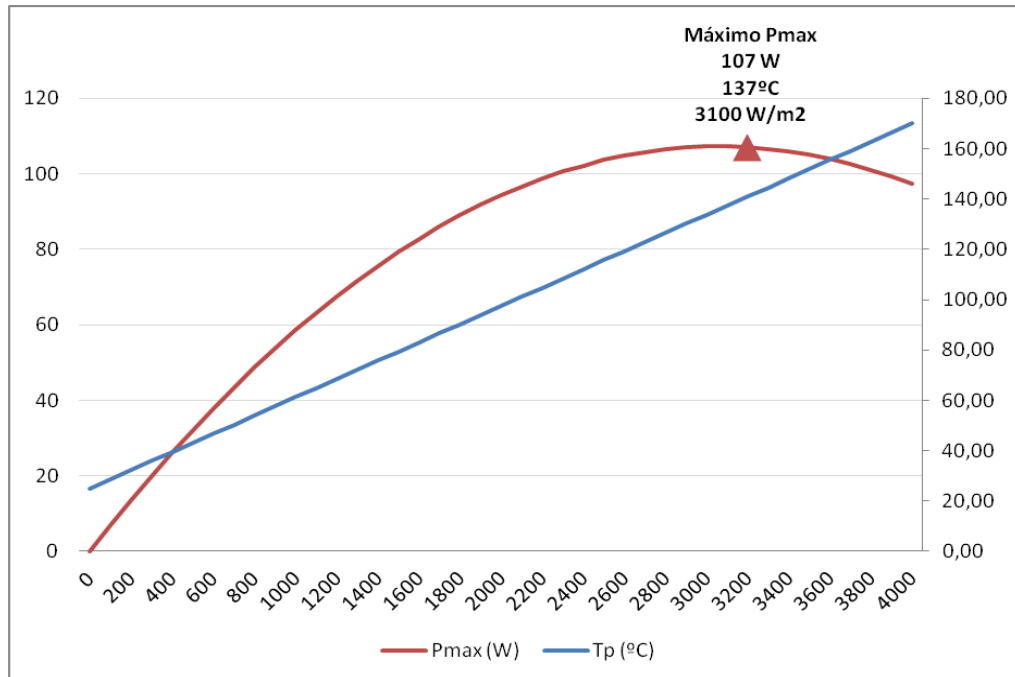


Figura 3.3.6 Curvas de Pmax (W) y Tp (°C) en función de la Irradiancia (W/m^2) [32]

3.4 Preselección de Materiales

3.4.1 Propiedades

Para saber qué materiales nos pueden ser útiles para nuestro objetivo debemos estudiar las siguientes características:

- Espectro de Reflexión
- Emisividad
- Durabilidad
- Coste
- Disponibilidad
- Información

Espectro de Reflexión

Es la propiedad más importante a la hora de seleccionar un material u otro.

La reflexión no solo debe ser alta, sino también coincidir con el espectro de absorción de nuestro panel fotovoltaico.

Para obtener un aprovechamiento máximo del material debemos realizar un estudio de su espectro de reflexión y, así, asegurarnos de que la reflectividad es alta en la banda óptima de longitudes de onda. En caso de que los espectros no fueran coincidentes, los fotones de la radiación incidente no podrían transformarse en electricidad, en cambio, lo único que harían sería calentar el panel, reduciendo la eficiencia del sistema.

La elección de superficies de colores claros, son las decisiones disponibles más obvias e inmediatas para incrementar el rendimiento. Sin embargo, es importante tener en cuenta que solo una fracción de la radiación solar que nos llega está dentro del espectro visible, por lo que también es posible lograr buenos funcionamientos con colores más oscuros.

Si bien es cierto que las superficies de colores claros tienden a tener también buena reflectividad en el infrarrojo cercano, podría darse el caso de la existencia de un material que tuviera una reflectividad promediada alta pero, sin embargo, tuviera una reflectividad baja en las longitudes de onda más favorables para el panel.

Es el caso de las superficies selectivas, aquellas que reflejan una gran porción de la radiación solar infrarroja pero absorben parte de la luz visible. Pueden ser de colores oscuros y seguir teniendo alta reflectividad solar. Este fenómeno se ilustra con mayor claridad inspeccionando el espectro de reflexión de la pintura negra acrílica y el espectro de esta misma pintura pero con un recubrimiento selectivo. En un día claro, más del 40% de la radiación incidente es infrarroja cercana. Consecuentemente, añadir el recubrimiento selectivo incrementa en un 28% la reflectividad media de la superficie. Esto demuestra que es posible desarrollar materiales que sean altamente reflectantes en la banda del infrarrojo cercano y tengan una amplia gama de colores.

Spectral reflectance of black acrylic paint and the same paint covered with XIR selective coating.

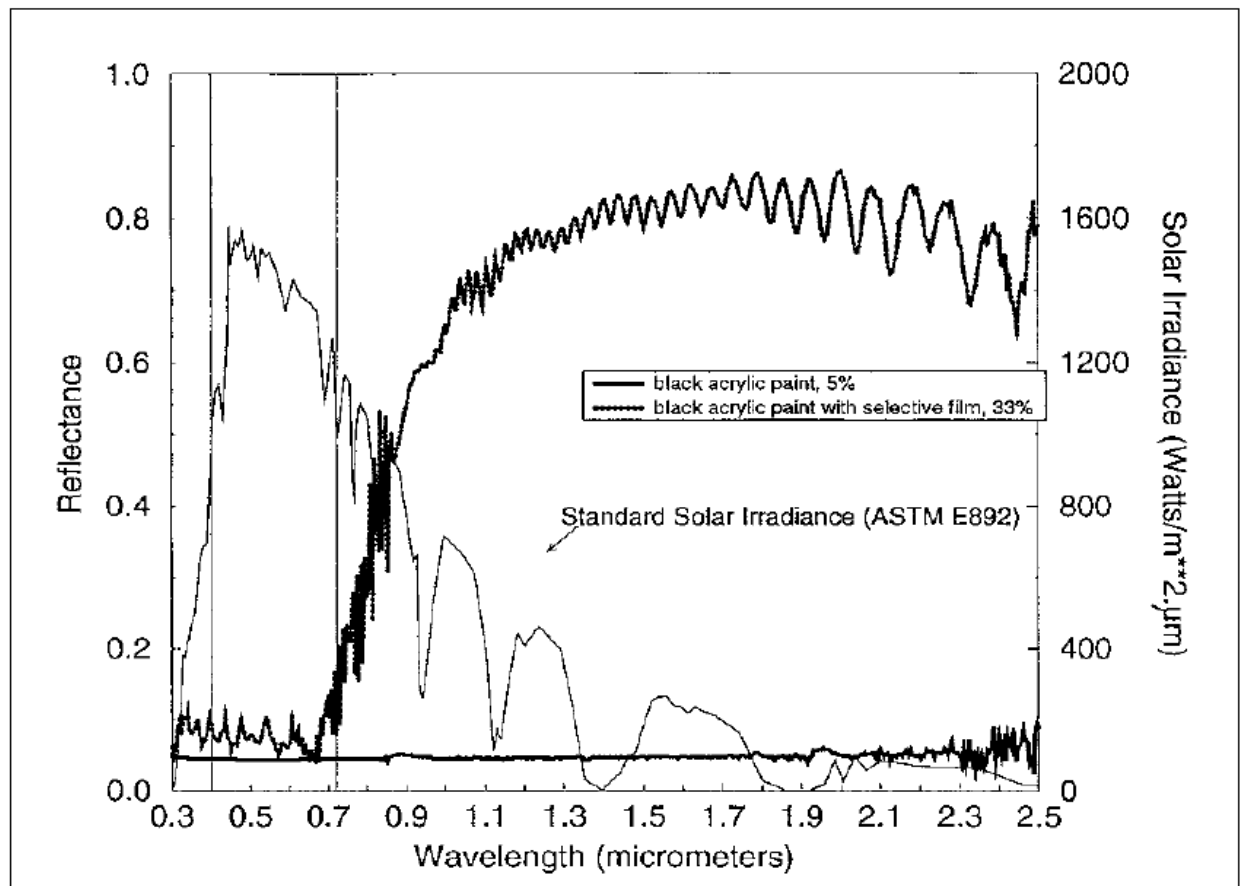


Figura 3.4.1.1 Respuesta Espectral con Recubrimiento Selectivo [15]

Emisividad

La emisividad es una propiedad que indica la facilidad que tiene un material para liberar energía en forma de calor a través de la emisión de radiación. Se define como el ratio de energía radiada por un objeto a una temperatura dada con respecto a un radiador perfecto o “cuerpo negro” a la misma temperatura y se mide de 0 a 1.

A igualdad de reflectividad, un material de baja emisividad libera menos energía en forma de radiación de onda larga, por lo tanto mantiene una mayor temperatura de equilibrio que uno de alta emisividad. El funcionamiento de los paneles se ve afectado negativamente por la temperatura, por lo que buscamos un bajo intercambio radiante.

La ecuación que rige el intercambio de calor a través de radiación es la ley de Stefan-Boltzmann:

$$Q_{Rad} = \delta \times \varepsilon \times T^4$$

Observándola nos damos cuenta de que la importancia de la temperatura es mucho mayor que la de la emisividad porque está elevada a la cuarta. Así deducimos que para obtener un menor intercambio radiante es mejor que la emisividad sea lo más alta posible. De esta manera, nuestros paneles fotovoltaicos recibirán menos energía de los materiales reflectantes cercanos, pudiendo mantener una temperatura más baja.

Ejemplos de materiales conocidos por tener baja emisividad son los metales que, por este motivo, alcanzan una alta temperatura cuando se ven expuestos a la radiación solar.

Debemos entender que ésta no es una propiedad que tenga un gran efecto final sobre el rendimiento, por lo que tiene una importancia relativa a la hora de la selección del material. Sin embargo, sí debe conocerse y considerarse un aspecto más a sumar en la determinación de materiales óptimos, concluyendo que aquellos con alta emisividad resultan más favorables.

Durabilidad

No sólo debe tenerse en cuenta la capacidad inicial de reflejar luz solar, sino también su disminución a lo largo de su vida útil. Factores como el deterioro progresivo o el ensuciamiento afectarán a las propiedades de los materiales, lo que provocaría que, con mayor o menor rapidez, no se mantengan en su punto óptimo de funcionamiento.

Estos reflectantes han de estar pensados para permanecer a la intemperie, por lo que deben de ser capaces de resistirla sin deteriorarse en gran medida. La durabilidad debe ser alta, ya que los paneles tienen una vida útil de entre veinte y cuarenta años. En caso de que estos componentes se deterioren en menos tiempo, el coste de reemplazarlos debe ser bajo para que sea rentable. En este trabajo se utilizarán elementos de construcción usuales, ya que nos centramos en una aplicación de la fotovoltaica más orientada al campo de la integración en la edificación y porque estos materiales tienen una demostrada resistencia a la intemperie.

En general, la mayoría de las superficies de colores claros, son similares en precio a las oscuras, pero duran más tiempo. Esto se debe a que son menos susceptibles a los daños provocados por la radiación solar, los choques térmicos y las dilataciones. Por lo tanto, aumentos en el albedo afectan también a la vida útil de los materiales, es decir, repercutimos no sólo en mejoras de las características físicas, sino también económicas.

Coste

El coste es un factor clave. De él depende la viabilidad o no de la aplicación de materiales reflectantes a la integración fotovoltaica. El uso de estos materiales podría incrementar la inversión, pero también aumentaría la producción de energía, por lo que debería ser rentable. De manera general, se debe realizar un estudio de los costes de inversión y de mantenimiento.

Disponibilidad

Dentro de las diferentes posibilidades, se ha de tener en cuenta que los recursos necesarios sean accesibles fácilmente, a ser posible, que se puedan encontrar en un entorno local. De nada nos sirve un material con unas características perfectas pero que sea tan escaso o difícil de obtener que haga imposible su aplicación práctica y a gran escala.

Información

Igualmente, debemos decantarnos por aquellas opciones de las que podamos encontrar más información. Si el material ha sido poco estudiado o utilizado nos encontramos con que sus características y comportamiento presentan grandes incertidumbres y pocas garantías, por lo que se complica su aplicación.

En primer lugar necesitamos una ligera orientación sobre qué materiales pueden ser más reflectantes que otros. Una buena propiedad para este propósito es el albedo, que se define como el porcentaje de radiación que una superficie refleja con respecto a la radiación que incide sobre ella.

TABLA DE ALBEDO Y EMISIVIDAD TÍPICOS DE ALGUNOS MATERIALES USADOS EN EDIFICACIÓN Y OTROS EXISTENTES EN EL ESPACIO URBANO					
ELEMENTO URBANO	Albedo	Emisividad	ELEMENTO URBANO	Albedo	Emisividad
Calle			Pasto seco	0.3	
Asfalto (fresco 0.05 - antiguo 0.2)	0.05-0.2	0.95	Pasto	0.16– 0.26	0.90 – 0.95
Muros			Pasto largo a corto	0.16– 0.26	0.9 – 0.95
Hormigón	0.10-0.35	0.94	Suelo promedio	0.3	
Piedra	0.20-0.40		Suelo húmedo a seco	0.05 – 0.4	0.98 – 0.90
Piedra blanqueada	0.8		Arena seca	0.20-0.30	76
Mármol blanco	0.55		Suelo arenoso	0.2-0.25	
Ladrillo coloreado claro	0.30-0.50		Plantas hoja caduca	0.20-0.30	
Ladrillo rojo	0.20-0.30	0.9	Bosque hoja caduca	0.15-0.20	0.97 – 0.98
Ladrillo oscuro	0.2		Bosques, coníferas	0.05-0.15	
			Suelo cultivado	0.2	
Piedra caliza	0.30-0.45		Arena húmeda	0.10-0.20	
Grava	0.72	0.28	Bosque de coníferas	0.10-0.15	
Cubiertas			Madera (roble)	0.1	
Asfalto liso	0.07		Madera (Nueva Plantación)		
Alquitrán con grava	0.08-0.18		Suelo cultivado (noche)	0.07-0.10	
Baldosas	0.10-0.35		Pasto artificial	0.05-0.10	
Pizarra	0.1		Hierba y paja de hojas	0.05	
Paja	0.15-0.20		Nieve Fresca	0.75-0.9	
Acero corrugado	0.10-0.16		Nieve vieja	0.35-0.7	
Cubierta alta reflexión después de un tiempo de instalada	0.6-0.7		Hielo	0.6	
Tejas de Cemento		0.63	Agua Profunda	0.05-0.2	
Concreto	0.10-0.37	0.71 – 0.91	Agua	0.03 – 0.1	0.92 – 0.97
Acero Galvanizado			Arcilla Húmeda	0.16	
Brillante	0.35	0.13	Arcilla Seca	0.23	
			Nubes gruesas	0.70-0.95	
			Nubes finas	0.2-0.65	
			Cal	0.45	
Papel de Aluminio Brillante	0.85	0.04	Yeso	0.55	
Pinturas			Granito	0.12-0.18	
Blanca, deslavada	0.50-0.90		Piedras	0.2-0.3	
Rojo, café, verde	0.20-0.35		Duna, Arena	0.2-0.45	
Negro	0.02-0.15		Algodón	0.20-0.22	
Pintura Aluminio	0.8	0.27-0.67	Gramma verde	0.26	
Pintura negra sobre aluminio	0.04	0.88			
Pintura blanca sobre aluminio	0.8	0.91			
Pigmento Blanco	0.85	0.96			
Pigmento Gris	0.03	0.87			
Pigmento Verde	0.73	0.95			
Urbano, medio	0.15				
Otros					
Cobertura de arena clara	0.40-0.60				

Tabla 3.4.1.1 Albedos y Emisividades Típicas [13]

Como era de esperar, las superficies claras tienen mayor capacidad de reflejar la radiación que las oscuras. Otro factor importante es el contenido en agua o humedad, que hace decrecer el albedo.

En nuestro caso, son dos los motivos por los que debemos centrarnos en materiales de construcción: porque

queremos favorecer la integración de la fotovoltaica en la edificación y porque poseen las características necesarias de durabilidad, información y disponibilidad que podrían hacer atractiva la aplicación a otros sectores.

En cuanto a la determinación de los valores de reflectividad solar, es poca la información contrastada que podemos encontrar. Los fabricantes, si es que miden la reflectividad, la suelen medir únicamente en el espectro visible para realizar estudios de color. Sin embargo, más de la mitad de la energía contenida en la luz solar se encuentra en las bandas del espectro del infrarrojo y el ultravioleta.

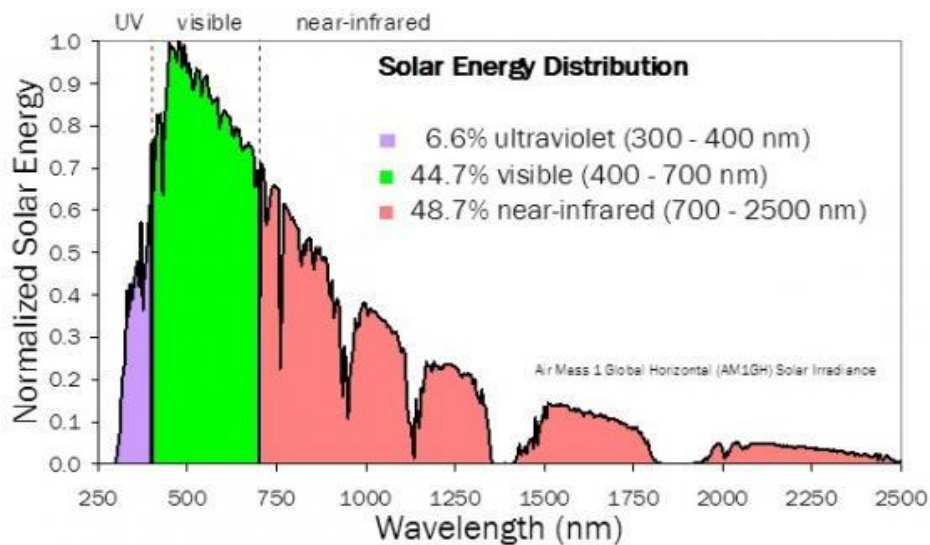


Figura 3.4.1.2 Distribución Energía Solar [16]

Estamos interesados en encontrar “materiales fríos”. Se entiende por “material frío”, aquel que tiene alta reflectividad y alta emisividad. Esto podría parecer que es imposible ya que se demuestra que las propiedades ópticas de las superficies cumplen la siguiente ley:

$$1 = \alpha + \rho + \tau$$

Donde:

α = Absortividad: Capacidad de un material de absorber la radiación incidente sobre él.

ρ = Reflectividad: Capacidad de un material de reflejar la radiación incidente sobre él.

τ = Transmisividad: Capacidad de un material de transmitir la radiación incidente sobre él. Esta propiedad siempre será cero en nuestro caso, ya que trabajaremos con materiales opacos.

Por la ley de Kirchhoff se demuestra que la emisividad es igual a la absortividad:

$$\varepsilon = \alpha$$

Por tanto, queda que:

$$1 = \varepsilon + \rho$$

Es decir, la reflectividad y la emisividad no pueden ser altas al mismo tiempo.

Los materiales fríos sí son capaces de tener altas reflectividades y emisividades debido a que se evalúan en diferentes longitudes de onda. La reflectividad es alta en el espectro solar, que es donde nos interesa reflejar la luz. En cambio, la emisividad es alta en el espectro térmico, ya que el material alcanza temperaturas relativamente bajas y emite radiación en longitud de onda larga.

Debido a que el espectro de la radiación térmica (4-80 micras) no se solapa con el espectro de la radiación solar (0.3-2.5 micras), la emisividad térmica es independiente de la reflectancia solar. Esta es la razón por la que distinguimos ambas propiedades cuando definimos los “materiales fríos”.

La emisividad infrarroja de los materiales de construcción no ha sido estudiada en detalle. Una estrategia

común para los no metales y los metales con revestimiento opaco es asumir que la emisividad es independiente de la longitud de onda e igual a 0.9, que es lo más habitual. Aún así, son necesarias más medidas para confirmar que esta regla general se cumple en la mayoría de los casos. Las superficies de metal desnudo y los revestimientos con pigmentos de aluminio suelen tener menor emisividad y esta es variable con la longitud de onda. A continuación una tabla con las emisividades más comunes:

2.- EMISIVIDADES NORMALES

METALES	Estado superficie	Temperatura (°C)	Emisividad	NO METALES	Estado superficie	Temperatura (°C)	Emisividad
Aluminio	placa pulida	25	0.040	Amianto	en cartón	37	0.960
Aluminio	placa pulida	200-600	0.038-0.06	Amianto	en papel	37	0.930
Aluminio	oxidado	100-500	0.20-0.33	Ladrillo	magnesita refractaria	1000	0.380
Aluminio	placa mate	25	0.070	Ladrillo	rojo, rugoso	20	0.930
Antimonio	pulido	37-260	0.28-0.31	Ladrillo	gris, satinado	1100	0.750
Latón	oxidado	200-500	0.600	Ladrillo	silice	540	0.800
Latón	pulido	20-300	0.05-0.032	Carbón	filamento	1050-1400	0.526
Latón	placa usada	50-350	0.220	Carbón	carbonilla bujías	95-270	0.953
Latón	mate	50	0.202	Carbón	negro de humo	20	0.930
Cromo	pulido	37-1100	0.058	Cerámica	alfarería, satinado	20	0.900
Cobre	negro oxidado	37	0.780	Cerámica	porcelana	22	0.920
Cobre	ligeramente mate	25	0.037	Cerámica	refractaria, negra	93	0.940
Cobre	pulido	37-260	0.04-0.05	Arcilla	caldeada	70	91
Cobre	pulido electrolítico	80	0.018	Hormigón	rugoso	37	0.94
Oro	no pulido	20	0.470	Vidrio	liso	22	0.940
Oro	pulido	37-260	0.020	Vidrio	Pyrex, plomo, sosa	260-530	0.95-0.85
Hierro	oxidado	100	0.740	Hielo	liso	0	0.966
Hierro	esmerilado	20	0.240	Hielo	rugoso	0	0.985
Hierro	pulido	425-1025	0.14-0.38	Mármol	grano fino pulido	22	0.93
Hierro	pulido electrolítico	175-225	0.052-0.064	Mica		37	0.75
Hierro	todo oxidado	20	0.69	Mampostería	emplastecida	0	0.930
Hierro	laminado	925-1100	0.87-0.95	Papel	ordinario	20	0.8-0.9
Fundición	mecanizada	22	0.44	Papel	amianto	20	0.950
Fundición	oxidada a 600°C	200-600	0.64-0.78	Papel	alquitranado	20	0.910
Plomo	oxidado a 200°C	200	0.63	Papel	ordinario	95	0.920
Plomo	oxidado gris	23	0.280	Yeso blanco	rugosa	20	0.930
Plomo	pulido	130-260	0.08-0.056	Porcelana	vidriada	20	0.930
Magnesio	pulido	37-260	0.07-0.13	Cuarzo fundido	rugoso	20	0.930
Magnesio	oxidado	275-825	0.55-0.2	Goma blanda	gris	25	0.860
Molibdeno	para filamentos	700-2600	0.10-0.20	Goma dura	negra rugosa	25	0.950
Molibdeno	pulido	150-480	0.02-0.05	Madera de haya	láminas	25	0.935
Monel	pulido	37	0.170	Madera de encina	láminas	25	0.885
Níquel	oxidado a 600°C	260-540	0.37-0.48	Tierra		37	0.950
Níquel	pulido	100-260	0.045-0.07	PINTURAS			
Níquel	electrolítico	37-260	0.04-0.06	Aluminio	bronce de	100	0.300
Platino	electrolítico	260-540	0.06-0.1	Aluminio	esmaltado rugoso	20	0.390
Platino	placa pulida	260-540	0.06-0.1	Aluminio pintado	calentado a 325°C	150-300	0.350
Platino	oxidado a 600°C	260-540	0.07-0.11	Aluminio	Al 10%, laca 22%	100	0.520
Platino	filamento	26-1225	0.04-0.19	Aluminio	Al 26%, laca 27%	100	0.300
Plata	pulida, pura	225-625	0.02-0.03	Laca	blanca	100	0.925
Plata	pulida	37-370	0.02-0.03	Laca	negra mate	80	0.970
Acero	pulido	23	0.160	Aceite	pintura	20	0.89-0.97
Estaño	brillante	225-265	0.02-0.03	Aceite pintura	todos los colores	100	0.92-0.96
Estaño	pulido	37-370	0.070	Baquelita	esmaltada	80	0.935
Tungsteno	para filamentos	3300	0.390	Esmalte	blanco rugoso	20	0.900
Tungsteno	filamento envejecido	25-3300	0.03-0.35	Esmalte	negro brillante	25	0.876
Cinc	oxidado	20	0.250	Pintura al aceite		1-200	0.885
Cinc	pulido	225-325	0.05-0.06	Imprimación minio		20-1100	0.930

Tabla 3.4.1.2 Emisividades Comunes

3.4.2 Materiales reflectantes existentes

Hay un gran número de materiales altamente reflectantes disponibles hoy en día. A los tejados se les puede añadir una superficie o grava blanca. En el caso residencial, se pueden utilizar tejas blancas, baldosas de cerámica blanca o cemento blanco. Los muros y paredes pueden ser revestidos de colores claros. Por último, pavimentos de alto albedo se obtienen a partir de cemento y asfalto convencional con agregados blancos.

Tejados

Un tejado puede ser continuo o formado por una serie de unidades superpuestas. Los continuos son típicamente utilizados en superficies planas o ligeramente inclinadas, mientras que los formados por unidades superpuestas se suelen utilizar en casos con más inclinación, de manera que puedan evacuar el agua.

En la fase de instalación, los tejados de alta reflectividad suelen estar disponibles a bajo o nulo coste adicional, ya que en muchos casos sólo habría de decidir entre un tipo u otro de grava, superficie o capa protectora, que varían mucho en color y albedo pero poco en precio. Los casos en que se necesite inversión, también son atractivos, ya que se amortizan debido a su mayor vida útil, mayor ahorro energético y mayor generación fotovoltaica.

Muros

También contribuye a aumentar el albedo de un edificio o incluso de una ciudad entera, ya que absorben radiación solar. Las fachadas sur son las que tienen más capacidad para absorber o reflejar radiación. Los muros son repintados cada cierto tiempo, cuando esto ocurra, una pintura clara puede ser seleccionada en lugar de otra más oscura sin ningún coste adicional.

Pavimento

Incluso el pavimento podría contribuir a una reflexión útil de la radiación solar en algunos casos, por lo que también es susceptible de mejoras a nivel de características ópticas. El asfalto más común utilizado en calles y carreteras tiene un albedo aproximado del 5-10% pero, con el paso del tiempo, su deterioro hace que suba hasta un 15-20%. Una técnica para obtener pavimentos de colores claros es usar agregados blancos o claros en el conglomerado del asfalto, como son la grava con alto contenido en sílice, cuarzo, piedra blanca, mármol blanco o algunos tipos de granito. En algunos casos se añade un recubrimiento que mejora su capacidad estructural, por lo que se puede hacer de un color claro y de esta forma aprovecharlo para mejorar además sus características ópticas y energéticas.

Materiales de construcción

Se ha hecho una recopilación de información pretendiendo cubrir el variado campo de los materiales de construcción, abarcando desde materiales sólidos compactos, como ladrillo, pavimento de terrazo o rocas, hasta materiales en polvo que requieren una preparación previa (cemento, materiales puzolánicos: cenizas volantes y rocas opalinas molidas).

Las puzolanas o materiales puzolánicos son materiales silíceos o aluminosilíceos a partir de los cuales se producía históricamente el cemento, desde la antigüedad romana hasta la invención del cemento Portland en el siglo XIX.

Se estudiarán, a continuación, materiales como:

- Ladrillo
- Cemento blanco
- Materiales puzolánicos: cenizas volantes y rocas opalinas molidas
- Pavimentos de terrazo
- Materiales pétreos: rocas opalinas

Se ha elegido el ladrillo por ser un material empleado en construcción con una importancia histórica destacada, particularmente en los lugares donde escasean los materiales pétreos. La composición química de los ladrillos afecta de modo importante a su reflectividad.

La utilización en este trabajo del cemento blanco, está ligado a su utilización como elemento propio de construcción, o como componentes de morteros para revestimientos.

Las cenizas volantes y rocas molidas son materiales empleados por su actividad puzolánica como adiciones al cemento, modificando el color del mismo.

La pieza de terrazo se elige por ser un material artificial habitualmente utilizado en construcción.

Los materiales pétreos, igualmente se estudian por su importancia histórica en la construcción. Las rocas opalinas son un tipo de rocas silíceas sedimentarias, formadas por acumulación de plantas o caparzones, cuyos esqueletos están formados por un gel silíceo.

En primera instancia se estudia su reflectividad en la banda visible por ser donde encontramos más información. Esto se debe a que es más habitual hacer un estudio del color de las superficies que de las características ópticas en todo el espectro. Aún así, es un buen indicador, ya que normalmente los materiales con buena capacidad de reflejar la luz visible también tienen buena capacidad de reflejar la luz en el resto de longitudes de onda.

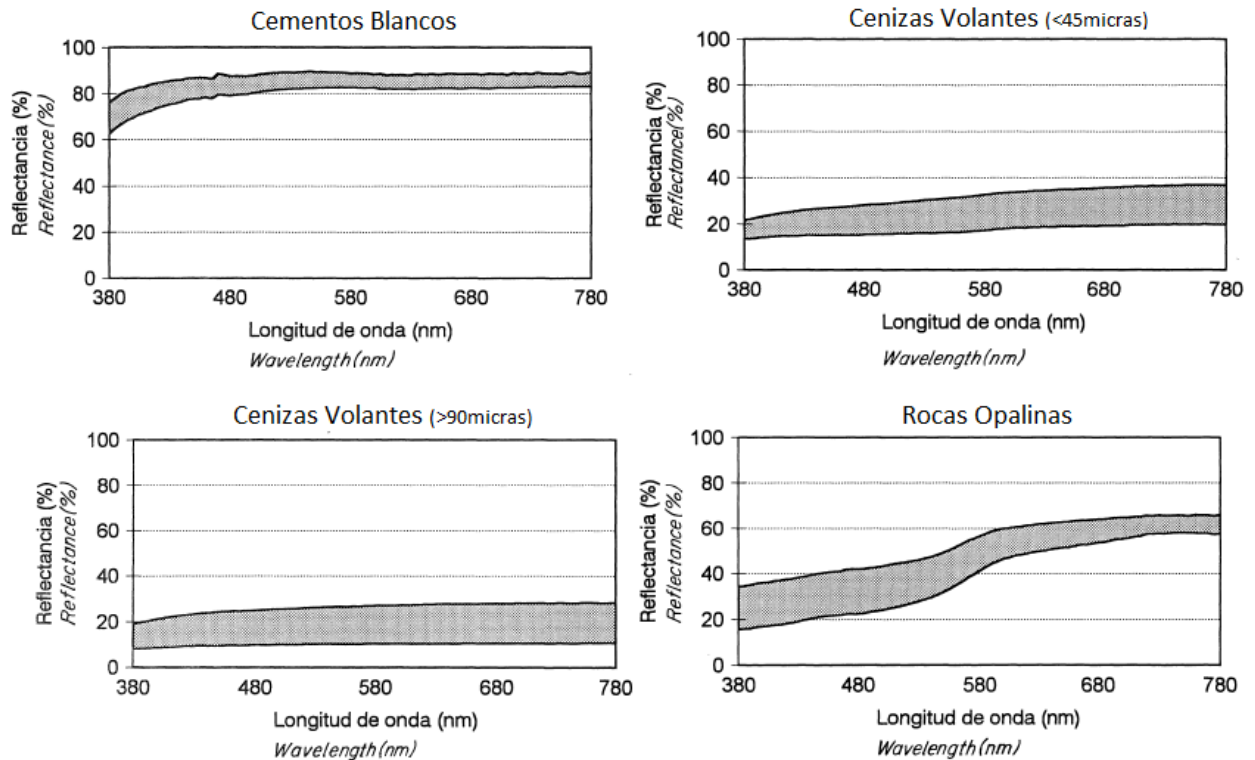


Figura 1.- Espectro visible de materiales de construcción-muestras en polvo: A) Cementos blancos; B) Cenizas volantes (< 45 μm); C) Cenizas volantes (> 90 μm); D) Rocas opalinas.

Figure 1.- Visible spectrum of construction material-powder samples: A) White cement; B) Fly ashes (< 45 μm); C) Fly ashes (> 90 μm); D) Opaline rocks.

Figura 3.4.2.1 Reflectancia Espectral de algunos Materiales de Contrucción I [12]

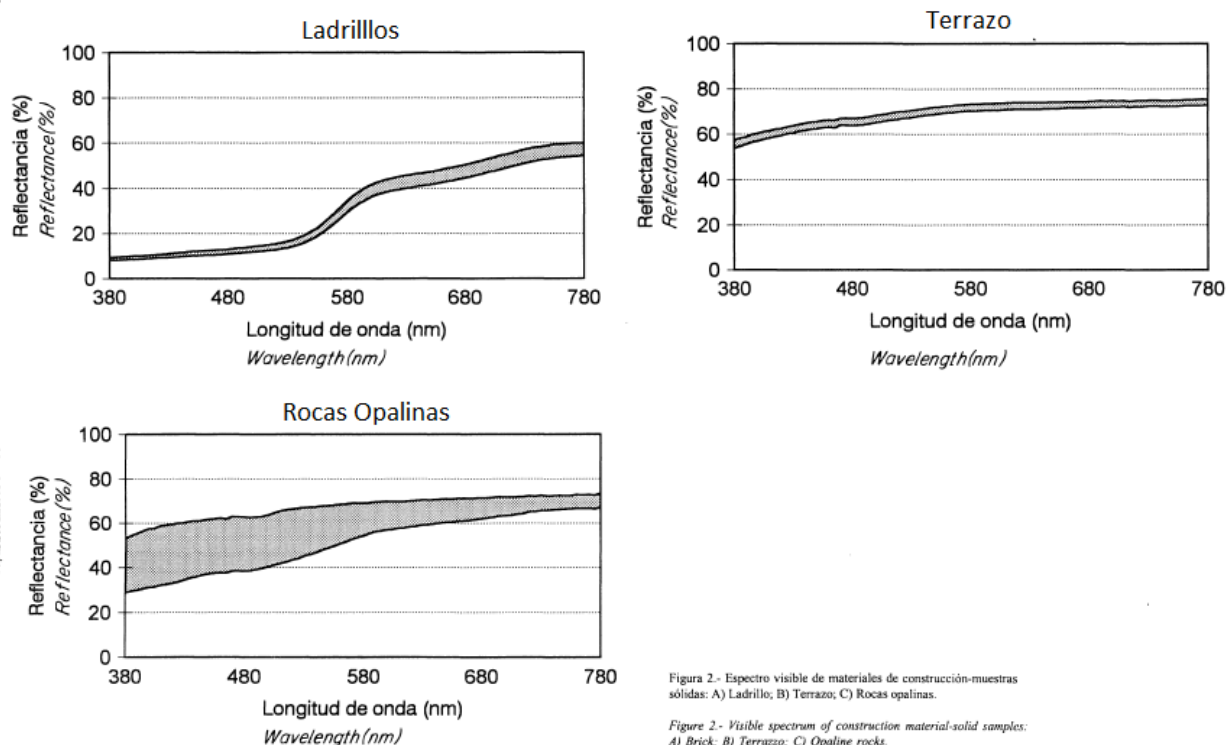


Figura 3.4.2.2 Reflectancia Espectral de algunos Materiales de Contrucción II [12]

TABLA I (TABLE I)

Valores de reflectancia (R) y coordenadas cromáticas (x, y) de los materiales de construcción estudiados

(Reflectance (R) and chromatic coordinates (x, y) values for the studied construction materials)

Muestra (Sample)		R(%)	x	y
Ladrillo (Brick)	Max.	27	0,433	0,368
	Min.	23	0,437	0,367
Pavimento terrazo (Terrazzo tiles)	Max.	72	0,320	0,327
	Min.	69	0,321	0,327
Cementos blancos (White cements)	Max.	89	0,311	0,320
	Min.	82	0,315	0,324
Materiales puzolánicos (Pozzolan materials) Cenizas volantes (Fly ashes) (< 45 μ m) (> 90 μ m)	Max.	32	0,329	0,332
	Min.	17	0,327	0,325
	Max.	27	0,320	0,327
	Min.	10	0,317	0,324
Rocas opalinas (Opaline rocks) Molidas (Powder) Roca (Stone)	Max.	52	0,347	0,339
	Min.	35	0,386	0,358
	Max.	68	0,321	0,327
	Min.	50	0,350	0,346

Tabla 3.4.2.1 Reflectancia de algunos Materiales de Construcción [12]

En lo que se refiere a los cementos blancos, la normativa es bastante estricta al establecer los mínimos en el grado de blancura; será considerado como tal si su reflectancia es superior al 75%. Además, la tendencia a incorporar adiciones al cemento, hace que el control sobre el color del material sea muy importante. Las adiciones pueden mejorar el comportamiento hidráulico o estructural del cemento, pero también producen variaciones importantes en el color, dependiendo del tipo y proporción utilizadas. Así, con cenizas volantes se obtendrán cementos más oscuros, debido a la presencia de partículas de carbón y con rocas opalinas cementos de tonalidad más rojiza, debido a la presencia de hierro.

El color de los ladrillos depende de su composición química, de ahí la importancia de obtener un estrecho intervalo de color, que indica una composición muy parecida.

Tampoco se ha obtenido una gran disparidad de valores en las medidas realizadas con en la pieza de terrazo, a pesar de su propia heterogeneidad.

Se deduce de este análisis preliminar que el cemento blanco podría ser una buena opción para nuestro objetivo. Además, en la primera tabla, se observó el alto albedo de la pintura clara, en concreto blanca, por lo que ambos serán estudiados más detalladamente.

En el ámbito de los metales, un buen candidato a un estudio más detallado es el aluminio, por ser un metal con buena reflectividad y con un coste relativamente bajo. Si bien es verdad que presenta una baja emisividad, esto tiene un peso relativo en el rendimiento final.

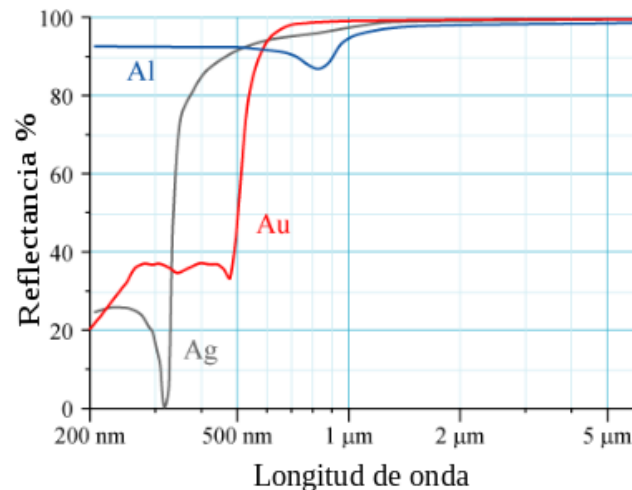


Figura 3.4.2.3 Reflectancia Espectral de algunos Metales [32]

3.4.3 Colores y texturas

En este apartado se pretende demostrar que existen una variedad de tonos y texturas que funcionarían perfectamente en la aplicación energética. Así, se lograría una mayor comercialización de estos productos, ya que el cliente puede decidir que estéticamente prefiere otro color y no está limitado al blanco únicamente.

Se ha estudiado la capacidad de 80 revestimientos de fachadas para reflejar la energía que le llega del Sol, y así generar más energía fotovoltaica y mitigar los efectos negativos de la Isla de Calor Urbana. Para ello se cuantifica el Índice de Reflectancia Solar (SRI), que se obtiene bajo la norma ASTM E1980.

Éste es un indicador que incorpora la reflectancia y la emitancia en un único término que representa la temperatura de un material expuesto al sol. El SRI cuantifica el calor que acumularía un material en relación a una superficie estándar negra y una blanca, bajo condiciones ambientales estándar. El SRI es un valor entre 0% (tan caliente como una superficie de color negro) y 100% (tan fresco como una superficie blanca).

The midday temperatures of various horizontal surfaces exposed to sunlight.

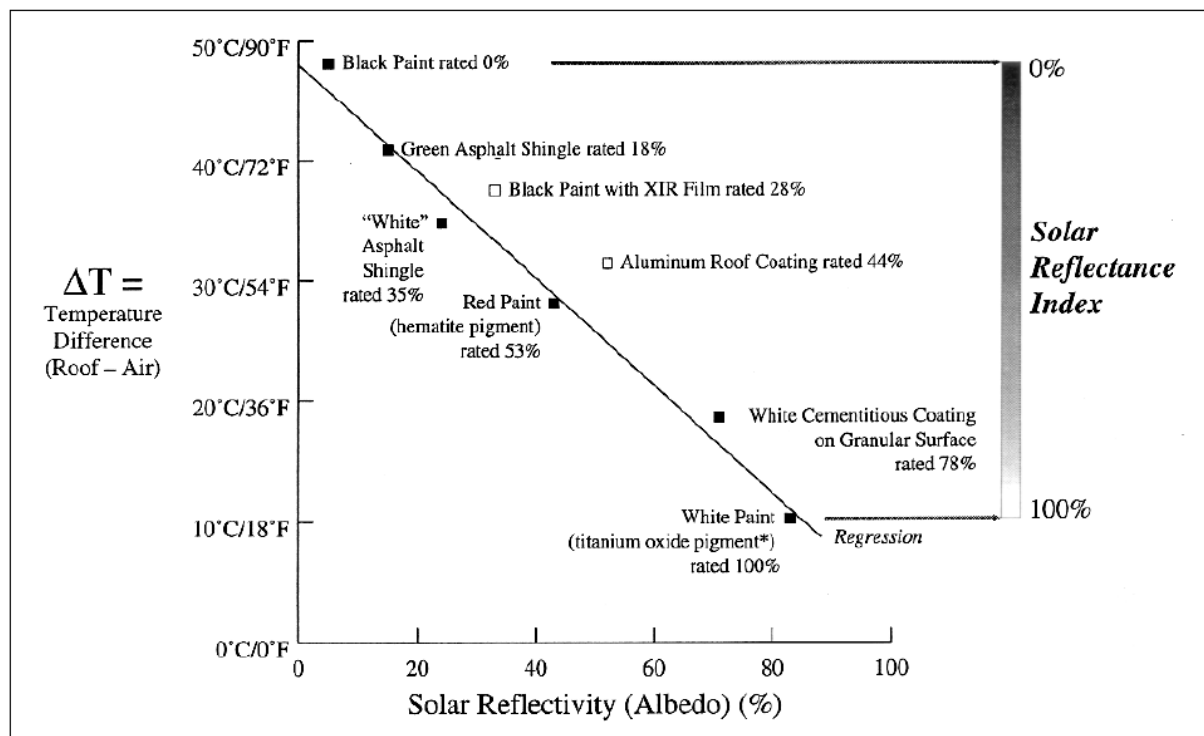


Figura 3.4.3.1 SRI y Diferencias de Temperaturas Típicas [13][15]

El material que posee el comportamiento más eficiente es el Acrílico Rulato Travertino fino marfil (SRI = 100%, Temp. Sup.= 35 °C, SIP02), mientras el más ineficiente es el Acrílico Llano fino gris plomo (SRI = 29%, Temp. Sup.= 74 °C). No obstante existen alternativas intermedias que resultan del efecto combinado de la composición del material, su color y textura.

La categorización de materiales de acuerdo a su Índice de Reflectancia Solar (SRI) permite seleccionar los revestimientos adecuados para disminuir las temperaturas superficiales del medio urbano y reducir en consecuencia el consumo energético de refrigeración en la edificación. También nos sirve como orientación a la hora de buscar materiales que sean capaces de reflejar mayor cantidad de energía y, por tanto, aumenten la eficiencia de los paneles fotovoltaicos. Esta categorización permitirá recomendar aquellos materiales que se encuentran disponibles localmente y que presentan mejor desempeño energético con el fin de alcanzar en el corto plazo la consecución de ciudades más sostenibles.

En este estudio se analizan en particular revestimientos verticales de composición acrílica (SIP) y de cemento (CW). Los revestimientos texturados acrílicos (SIP), están compuestos a base polímeros acrílicos, cargas minerales de granulometría múltiple, pigmentos inorgánicos con elevada resistencia UV, y aditivos químicos. Los morteros cementicios (CW), están compuestos a base de cemento blanco, marmolinas, cal, pigmentos, aditivos orgánicos e inorgánicos, cargas minerales de granulometría clasificada, resinas sintéticas, funguicidas y alguicidas en polvo aptos para revestimientos de muros y fachadas.

Se seleccionaron 8 colores, de acuerdo a la demanda en el mercado y frecuencia de uso:

- blanco
- marfil
- piedra parís
- ocre
- terracota
- gris perla
- gris cemento
- gris plomo

Se monitorizaron cinco texturas, de granulometría y acabado variado, para la composición acrílica y de cemento.

En la composición acrílica, según denominación dada por el fabricante se clasificaron en: rulato travertino fino (rf) y grueso (rg), llaneado fino (lf) y grueso (lg), granitex mediano (gm).

En los revestimientos de cemento (CW): texturable rulato (tr) y travertino (tt), salpicado (ss) y planchado (sp), granitex mediano (gm)

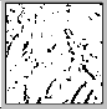


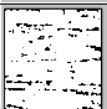


REVESTIMIENTOS VERTICALES				
COMPOSICIÓN	TEXTURA		TERMINACIÓN	COLOR
ACRÍLICA (SIP)		Rulato Travertino	Fino (rf)	Blanco
			Grueso (rg)	Marfil Piedra Paris
		Llaneado	Fino (lf)	Ocre
			Grueso (lg)	Terracota Gris Perla
		Granitex	Medio (gm)	Verde Hormigón
				Gris Plomo
CEMENTICIA (CW)		Texturable	Rulato (tr)	Blanco
			Travertino (tt)	Marfil Piedra Paris
		Salpicado	Salpicado (ss)	Ocre
			Planchado (sp)	Terracota Gris Perla
		Granitex	Medio (gm)	Verde Hormigón
				Gris Plomo

Tabla 3.4.3.1 Clasificación de Texturas y Colores [5]

Tabla 3 - Enumeración de los revestimientos verticales estudiados con sus respectivos códigos asignados, denominaciones, temperaturas superficiales (Ts) en grados Celsius, albedo ($\hat{\alpha}$), emisividad (ϵ), y Índice de Reflectancia Solar (SRI) en porcentajes

REV. ACRÍLICO							REV. CEMENTICIO						
Cod.	Denom.	Color	$\hat{\alpha}$	ϵ	Ts (°C)	SRI (%)	Cod.	Denom.	Color	$\hat{\alpha}$	ϵ	Ts (°C)	SRI (%)
SIP01	Rulato Trav. Fino (rf)	Blanco	0.86	0.85	39	97	CW41	Texturable Rulato (tr)	Blanco	0.85	0.90	38	98
SIP02	Rulato Trav. Fino (rf)	Marfil	0.90	0.90	35	100	CW42	Texturable Rulato (tr)	Marfil	0.78	0.85	44	88
SIP03	Rulato Trav. Fino (rf)	Piedra Paris	0.81	0.88	41	92	CW43	Texturable Rulato (tr)	Piedra Paris	0.72	0.80	49	77
SIP04	Rulato Trav. Fino (rf)	Ocre	0.51	0.95	59	57	CW44	Texturable Rulato (tr)	Ocre	0.55	0.85	59	58
SIP05	Rulato Trav. Fino (rf)	Terracota	0.45	0.95	63	50	CW45	Texturable Rulato (tr)	Terracota	0.53	0.93	59	58
SIP06	Rulato Trav. Fino (rf)	Gris Perla	0.60	0.85	56	64	CW46	Texturable Rulato (tr)	Gris Perla	0.64	0.82	54	68
SIP07	Rulato Trav. Fino (rf)	Verde Hormigón	0.44	0.95	63	49	CW47	Texturable Rulato (tr)	Verde Hormigón	0.47	0.95	62	52
SIP08	Rulato Trav. Fino (rf)	Gris Plomo	0.34	0.95	69	37	CW48	Texturable Rulato (tr)	Gris Plomo	0.37	0.95	67	41
SIP09	Rulato Trav. Grueso (rg)	Blanco	0.79	0.85	43	89	CW49	Texturable Travertino (tt)	Blanco	0.57	0.85	58	60
SIP10	Rulato Trav. Grueso (rg)	Marfil	0.86	0.90	38	99	CW50	Texturable Travertino (tt)	Marfil	0.77	0.85	45	86
SIP11	Rulato Trav. Grueso (rg)	Piedra Paris	0.82	0.90	40	94	CW51	Texturable Travertino (tt)	Piedra Paris	0.71	0.90	48	79
SIP12	Rulato Trav. Grueso (rg)	Ocre	0.47	0.95	62	52	CW52	Texturable Travertino (tt)	Ocre	0.63	0.90	53	69

SIP13	RulatoTrav Grueso (rg)	Terracota	0.35	0.94	69	38	CW53	TexturableTrav ertino (tt)	Terracota	0.48	0.95	61	53
SIP14	RulatoTrav Grueso (rg)	Gris Perla	0.51	0.95	60	56	CW54	TexturableTrav ertino (tt)	Gris Perla	0.70	0.90	49	78
SIP15	Rulato Grueso (rg)	Verde Hormigón	0.42	0.95	65	46	CW55	TexturableTrav ertino (tt)	Verde Hormigón	0.54	0.90	59	58
SIP16	RulatoTrav Grueso (rg)	Gris Plomo	0.34	0.95	69	38	CW56	TexturableTrav ertino (tt)	Gris Plomo	0.50	0.90	61	54
SIP17	Llaneado Fino (lf)	Blanco	0.82	0.80	42	91	CW57	SalpicrateSalpic (ss)	Blanco	0.81	0.85	42	91
SIP18	Llaneado Fino (lf)	Marfil	0.53	0.85	60	55	CW58	SalpicrateSalpic (ss)	Marfil	0.80	0.90	42	91
SIP19	Llaneado Fino (lf)	Piedra Paris	0.90	0.90	35	100	CW59	SalpicrateSalpic (ss)	Piedra Paris	0.68	0.90	50	76
SIP20	Llaneado Fino (lf)	Ocre	0.83	0.90	40	95	CW60	SalpicrateSalpic (ss)	Ocre	0.58	0.95	55	65
SIP21	Llaneado Fino (lf)	Terracota	0.43	0.95	64	48	CW61	SalpicrateSalpic (ss)	Terracota	0.60	0.90	55	66
SIP22	Llaneado Fino (lf)	Gris Perla	0.77	0.90	44	87	CW62	SalpicrateSalpic (ss)	Gris Perla	0.72	0.85	48	79
SIP23	Llaneado Fino (lf)	Verde Hormigón	0.41	0.95	65	45	CW63	SalpicrateSalpic (ss)	Verde Hormigón	0.52	0.90	60	56
SIP24	Llaneado Fino (lf)	Gris Plomo	0.26	0.95	74	29	CW64	SalpicrateSalpic (ss)	Gris Plomo	0.39	0.90	68	41
SIP25	Llaneado Grueso (lg)	Blanco	0.83	0.85	40	94	CW65	Salpicrate Planchado (sp)	Blanco	0.84	0.80	40	94

Tabla 3 - Enumeración de los revestimientos verticales estudiados con sus respectivos códigos asignados, denominaciones, temperaturas superficiales (Ts) en grados Celsius, albedo (\hat{a}), emisividad (ϵ), y Índice de Reflectancia Solar (SRI) en porcentajes (continuación)

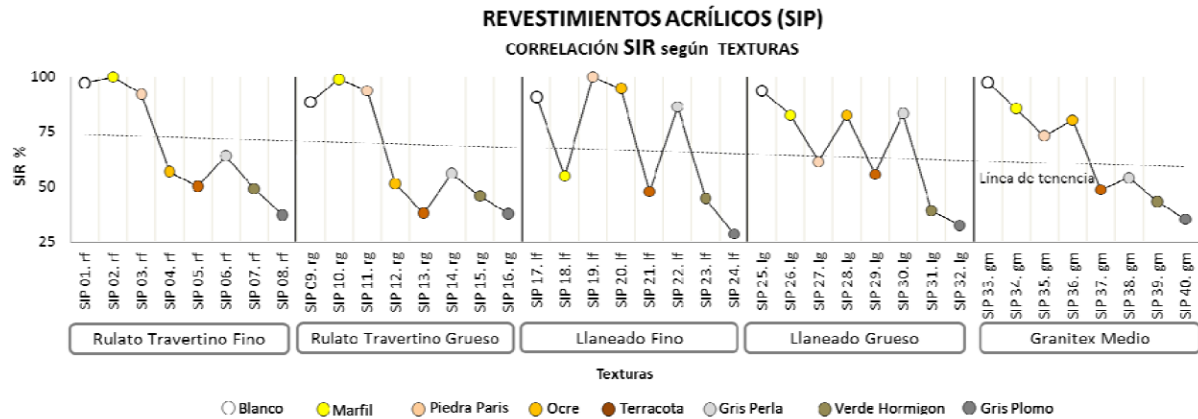
REV. ACRÍLICO							REV. CEMENTICIO						
Cod.	Denom.	Color	\hat{a}	ϵ	Ts (°C)	SRI (%)	Cod.	Denom.	Color	\hat{a}	ϵ	Ts (°C)	SRI (%)
SIP26	Llaneado Grueso (lg)	Marfil	0.75	0.85	46	83	CW66	Salpicrate Planchado (sp)	Marfil	0.75	0.85	46	83
SIP27	Llaneado Grueso (lg)	Piedra Paris	0.58	0.85	57	62	CW67	Salpicrate Planchado (sp)	Piedra Paris	0.63	0.85	54	68
SIP28	Llaneado Grueso (lg)	Ocre	0.74	0.90	46	83	CW68	Salpicrate Planchado (sp)	Ocre	0.52	0.95	59	58
SIP29	Llaneado Grueso (lg)	Terracota	0.50	0.95	60	56	CW69	Salpicrate Planchado (sp)	Terracota	0.48	0.95	61	54
SIP30	Llaneado Grueso (lg)	Gris Perla	0.74	0.90	46	83	CW70	Salpicrate Planchado (sp)	Gris Perla	0.67	0.85	51	73
SIP31	Llaneado Grueso (lg)	Verde Hormigón	0.36	0.95	68	39	CW71	Salpicrate Planchado (sp)	Verde Hormigón	0.50	0.90	61	54
SIP32	Llaneado Grueso (lg)	Gris Plomo	0.30	0.95	72	33	CW72	Salpicrate Planchado (sp)	Gris Plomo	0.36	0.95	68	40
SIP33	Granitex Medio (gm)	Blanco	0.86	0.85	39	98	CW73	Granitex Medio (gm)	Blanco	0.82	0.85	41	92
SIP34	Granitex Medio (gm)	Marfil	0.77	0.85	45	86	CW74	Granitex Medio (gm)	Marfil	0.77	0.85	45	85
SIP35	Granitex Medio (gm)	Piedra Paris	0.67	0.85	51	73	CW75	Granitex Medio (gm)	Piedra Paris	0.73	0.90	47	82
SIP36	Granitex Medio (gm)	Ocre	0.72	0.90	47	81	CW76	Granitex Medio (gm)	Ocre	0.53	0.90	59	57
SIP37	Granitex Medio (gm)	Terracota	0.44	0.95	63	49	CW77	Granitex Medio (gm)	Terracota	0.53	0.90	59	57
SIP38	Granitex Medio (gm)	Gris Perla	0.50	0.92	61	54	CW78	Granitex Medio (gm)	Gris Perla	0.72	0.80	48	78
SIP39	Granitex Medio (gm)	Verde Hormigón	0.39	0.95	66	43	CW79	Granitex Medio (gm)	Verde Hormigón	0.49	0.90	61	53
SIP40	Granitex Medio (gm)	Gris Plomo	0.32	0.95	70	35	CW80	Granitex Medio (gm)	Gris Plomo	0.71	0.95	47	80

Tabla 3.4.3.2 Enumeración de Texturas y Colores [5]

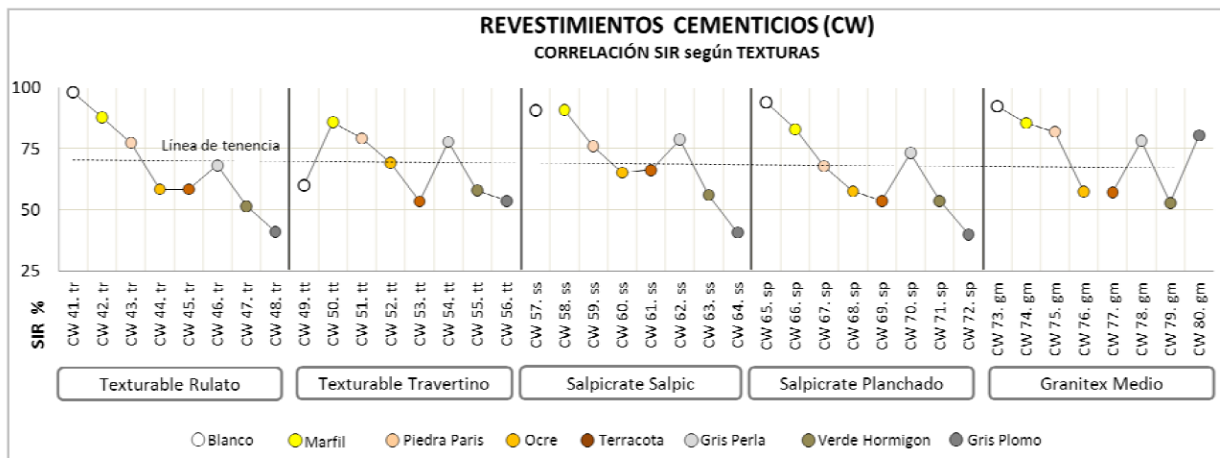
Máximos niveles de albedo

Los niveles de albedo (\hat{a}) en el total de las muestras oscilan entre 0.90 y 0.29. Los materiales que poseen mayor reflectancia solar son los acrílicos RulatoTravertino fino blanco -SIP02- y el Llameado fino piedra parís-SIP19-, en donde \hat{a} es igual a 0.90. Los altos valores de albedo de ambos materiales, corresponden con las menores temperaturas registradas en el total de las muestras.

Gráficamente se pueden observar los resultados del estudio con mayor claridad.



- Índice de Reflectancia Solar de Revestimientos Acrílicos según clasificación de textura para cada color



Índice de Reflectancia Solar de Revestimientos Cementicios según clasificación de textura para cada color

Figura 3.4.3.2 SRI para varias Texturas y Colores [5]

3.4.4 Deterioro y ensuciamiento

Las propiedades reflectantes de los materiales empleados en construcción pueden variar por diferentes causas:

- Acumulación de suciedad y polvo.
- Formación de pátinas de envejecimiento de orígenes diversos.
- Uso de materiales diferentes con distinta evolución a lo largo del tiempo.
- Deterioro natural del material. Hay que tener en cuenta, también, la orientación en el edificio ya que los fenómenos meteorológicos no actúan de igual modo en todas las fachadas.
- Uso de productos de restauración y protección.

Muchos cambios que se producen en piedras u otros materiales de construcción llevan asociados procesos químicos de disolución, de formación y destrucción de minerales, biológicos, debidos a la presencia de microorganismos y antropogénicos, por contaminación ambiental.

Se llaman pátinas a aquellas capas que aparecen sobre la superficie de algunos materiales por causas naturales tan diversas como reacciones químicas, colonización biológica o formación de costras a causa de la atmósfera contaminada. Se puede formar una pátina negra de suciedad o verdosa, debida a microorganismos que, incluso, pueden llegar a alterar la naturaleza inicial de los materiales sobre los que se deposita.

Para los tejados blancos, el albedo típicamente decrece con el tiempo, especialmente en los tejados planos, que son más susceptibles a la acumulación de suciedad que los tejados inclinados. Dependiendo de la cantidad de suciedad que se acumule, podría ser rentable incluir limpiezas periódicas de los tejados de alta reflectividad como parte de un programa de mantenimiento.

Los materiales oscuros suelen aumentar su albedo con el paso del tiempo debido a la acumulación de suciedad o la oxidación. En cambio, el albedo de materiales más reflectantes se reduce conforme se acumula suciedad sobre la superficie. Un estudio realizado a 25 muestras de revestimientos de alta reflectividad concluyó que, en general, el albedo caía un 15% en el primer año, seguido por un 2% anual en los años siguientes, aunque depende del material. Este mismo estudio mostró que los recubrimientos de cemento son una opción particularmente atractiva por su bajo coste y una menor reducción de la reflectividad con el paso del tiempo.

3.4.5 Costes

El coste de cambiar el albedo de un edificio es cero si el cambio se incluye en la rutina del mantenimiento. El repintado por ejemplo se realiza cada ciertos años. De la misma manera, el albedo del tejado se puede incrementar con un recubrimiento blanco durante las reparaciones.

El albedo urbano puede ser aumentado gradualmente y sin coste si se seleccionan superficies de alta reflexión en lugar de superficies oscuras en el momento de reparación o sustitución. La mayoría de los materiales están disponibles en colores claros por un precio similar. Además, los materiales con alto albedo tienen una vida más larga porque no se ven tan dañados por los efectos de la radiación ni las dilataciones térmicas, por lo que los costes anuales se verían reducidos.

En cada zona geográfica habría que realizar un estudio económico similar al que se muestra a continuación, llevado a cabo en California en 1992.

En él se comparan materiales convencionales de baja reflectividad con su alternativa de alta reflectividad. Se revisan el albedo, el coste y la vida útil de cada material. De esta manera se puede decidir con criterio a la hora de seleccionar el material a utilizar.

Table 3. Low and high solar-reflectance options for typical roofing materials

Low solar-reflectance option			High solar-reflectance option		
Description	Albedo (%)	Average cost ^a (\$ ft ²)	Description	Albedo (%)	Additional cost ^b (% of avg. cost in column 2)
<i>Sloped roofs</i>					
Composite asphalt shingle; fiber-glass asphalt shingle; organic asphalt shingle	5–15	0.95–1.92	White asphalt shingle with “premium” white granules	35	< 1%
Clay tile	25–35	7.22–9.55	White painted clay or concrete tile	70–80	35%
Concrete tile	10–30	3.17–4.80	White concrete tile	70–80	< 20%
Fiber-cement shingle	10–30	2.84	White fiber-cement tile	60–80	0
Unpainted metal (steel, aluminum) shingle	70 ^c	3.49–6.00	White painted metal shingle	55–80	0
<i>Flat or low-slope roofs</i>					
Built-up roof with dark gravel;	5–10		Built-up roof with white gravel;	40	0
Built-up or coal tar roof with smooth asphalt surface;	5–10	1.25–2.13	Built-up roof with gravel and cementitious coating;	60	< 20%
Built-up roof with aluminum coating	30–55 ^c		Smooth surface built-up roof with white roof coating	70–80	< 30%
Black single-ply membrane (EPDM, CPE, CPSE)	5–10	1.06–2.01	White single-ply membrane (EPDM, CPE, CPSE);	70–80	20%
			White coating on a black single-ply membrane	70–80	< 30%
Modified bitumen roof with mineral-surface cap sheet	10–20	1.44–1.84	White cementitious coating over a mineral surface cap sheet	65	< 20%
Unpainted metal roof	70 ^c	1.72–3.74	White painted metal roof	55–80	0

Tabla 3.4.5.1 Estudio Económico Modelo I [14]

Table 4. Cost and albedo estimates for various pavements from Martien *et al.* (1989) with updated lifetimes

Pavement type	Service life (yr)	Cost 94\$/m ²	Albedo (new) (%)	Albedo (weathered) (%)
Asphalt (18 cm)	15	18	5–10	15–20
Whitetopping (13 cm)	25	18	35–40	25–30
Asphalt with light aggregate (18 cm)	15	18	5–10	35–40
Whitetopping with white cement ^a	25	21	70–80	40–60

^aGray (1990).

Note: The costs are for repaving an existing city street in the Sacramento area, and do not include the cost of preparing the area for paving. We compare pavement thicknesses with similar load-bearing capacity (a thinner layer of concrete is needed to match an asphalt pavement).

Tabla 3.4.5.2 Estudio Económico Modelo II [14]

TABLE 6†. COMPARATIVE COSTS ESTIMATES FOR FLAT ROOFS^a

Roof material	Reroofing Applications					Retrofit
	Built-up asphalt with dark gravel	Built-up asphalt with reflective paint	Built-up asphalt with white gravel	Modified bitumen with white gravel	Single-ply white polymer roofing	White acrylic roof paint (2 coats)
Bare material cost per square meter ^b	\$3.6	\$3.6	\$3.6	\$5.6	\$6.8	\$2
Bare labor cost per square meter ^b	\$7.5	\$7.5	\$7.5	\$3.3	\$3.1	\$2.0
Bare total cost per square meter ^b	\$11.1	\$11.1	\$11.1	\$8.9	\$9.9	\$4.0
Subcontractor total fee per square meter ^b	\$14.0	\$14.0	\$14.0	\$11.3	\$12.4	\$5.2
Albedo (estimated new) ^c (%)	5-10	70-80	50-60	50-60	70-80	70-80
Albedo (estimated weathered) ^c (%)	15-20	60-70	40-50	40-50	60-70	60-70
Expected life (years) ^d	20	20	20	20	20	5-10
Annualized cost per square meter ^e	\$1.32	\$1.32	\$1.32	\$1.07	\$1.17	\$0.91

Tabla 3.4.5.3 Estudio Económico Modelo III [11]

3.4.6 Conclusiones

El espectro de reflexión es la más importante de las seis propiedades que debemos evaluar, ya que debe coincidir con el espectro que el panel es capaz de absorber.

Buscamos materiales de construcción que puedan ser considerados “materiales fríos”, es decir, con alta reflectividad y alta emisividad. Éstos pueden ser utilizados en tejados, muros e incluso pavimentos.

Los resultados obtenidos confirman la importancia de catalogar energéticamente los materiales disponibles para la aplicación a envoltentes y, así poder transferir esta información a los responsables del desarrollo del hábitat en nuestra región.

Está en proceso la creación de bases de datos de “materiales fríos” que incluirán tablas de reflectividades solares y emisividad infrarrojas de materiales de construcción y una lista de fabricantes. Estarán acompañadas de análisis que interpretarán los datos y aconsejarán acerca de su uso. (Base de datos de pigmentos: <http://coolcolors.lbl.gov/LBNL-Pigment-Database/database.html>).

Las prestaciones energéticas de los revestimientos se deben asociar al comportamiento simultáneo de la textura, color y composición. Las gráficas que derivan de este análisis funcionan como un ábaco de fácil entendimiento y aplicación. Pueden servir para seleccionar el revestimiento más adecuado que al mismo tiempo satisfaga sus necesidades estéticas, aumente las ganancias fotovoltaicas y disminuya las temperaturas urbanas.

Las propiedades de las superficies se deterioran con el tiempo y la intemperie, por lo que se debe tener en cuenta que algunos materiales necesitarán un cierto mantenimiento.

Se debe realizar un estudio de los costes de instalación y de mantenimiento que tenga en cuenta este deterioro progresivo de la capacidad de reflexión. Aunque, se ha comprobado que muchos de los materiales están disponibles sin ningún coste adicional a los tradicionales más oscuros.

Gracias a esta preselección, se identifican varios materiales que son interesantes para estudiarlos en mayor profundidad debido a que, además de tener una alta capacidad de reflexión, tienen otras propiedades características que los hacen atractivos para nuestro objetivo:

- **Cemento blanco:** Por su gran durabilidad que hace que necesite un mantenimiento prácticamente nulo y tenga un ciclo de vida muy largo.
- **Pintura blanca acrílica:** Por su bajo precio, gracias al cuál es rentable aunque la superficie deba ser repintada periódicamente.
- **Pintura blanca de dióxido de titanio:** Por bajo precio y por ser una de las pinturas más utilizadas y conocidas.
- **Aluminio blanco lacado:** Como representación de los metales, ya que tiene una elevada reflectividad y un precio bajo comparado con los demás metales.
- **Aluminio anodizado:** Como segunda muestra de aluminio pero con un acabado superficial diferente.

De estos materiales se comprobarán sus reflectividades espectrales para todas las longitudes de onda, de manera que podamos decantarnos por uno u otro en función de la tecnología fotovoltaica a la que deseemos aplicarlos.

4 MUESTRAS RELACIONADAS

4.1 Ensayos

Una vez realizada la selección definitiva de los materiales, se procede a ensayar las muestras con el objetivo de confirmar de una manera precisa los datos del análisis bibliográfico.

Se opta finalmente por cinco materiales:

- Aluminio Lacado
- Aluminio Anodizado
- Pintura Blanca de Dióxido de Titanio
- Pintura Blanca Acrílica
- Cemento Blanco

Necesitamos cuantificar la reflectividad en función de la longitud de onda y, así, saber qué material se ajusta mejor a cada tecnología fotovoltaica. Para ello contamos con un espectrorradiómetro, el Licor LI-1800.

Espectrorradiómetro Licor LI-1800 y esfera integradora:

- Componentes y montaje:

El equipo consta de los siguientes componentes:

1. Licor 1800
2. Esfera integradora
3. Lámpara iluminadora
4. Fuente de alimentación y batería de la lámpara
5. Receptor coseno (fibra óptica)
6. PC con el programa
7. Dos cables para conectar el Licor 1800 al PC (RS-232 que por un extremo es hembra con 9 pin y por el otro es macho con 25 pin)
8. Tres manuales: resumen actual en español, resumen del software y completo

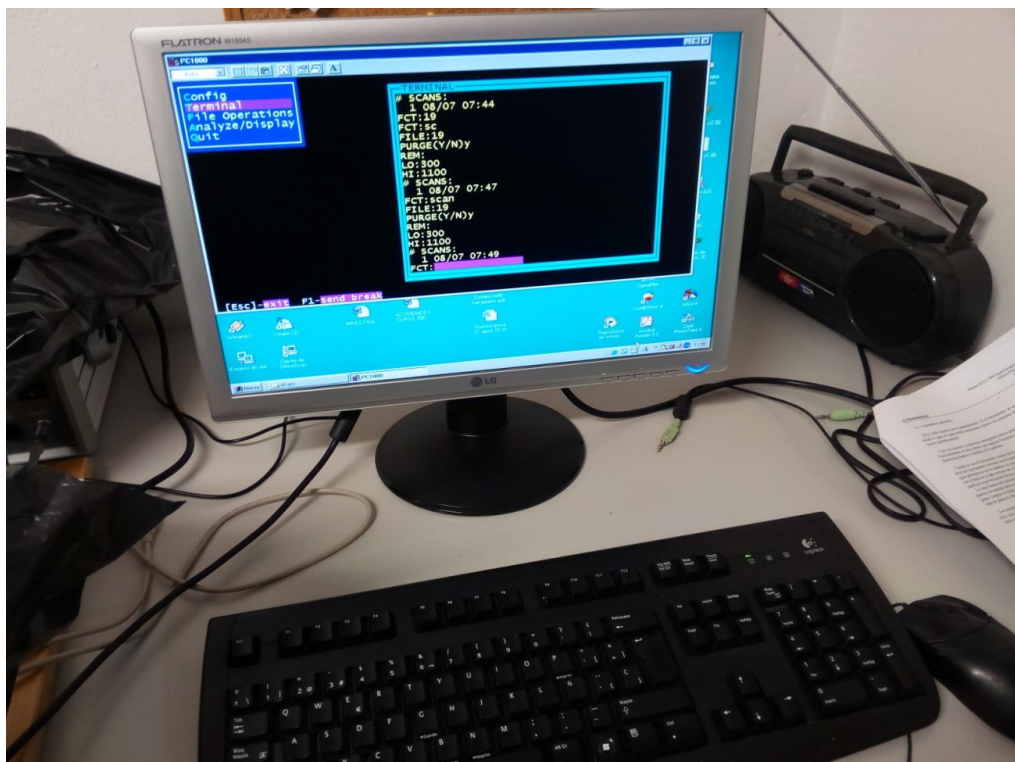
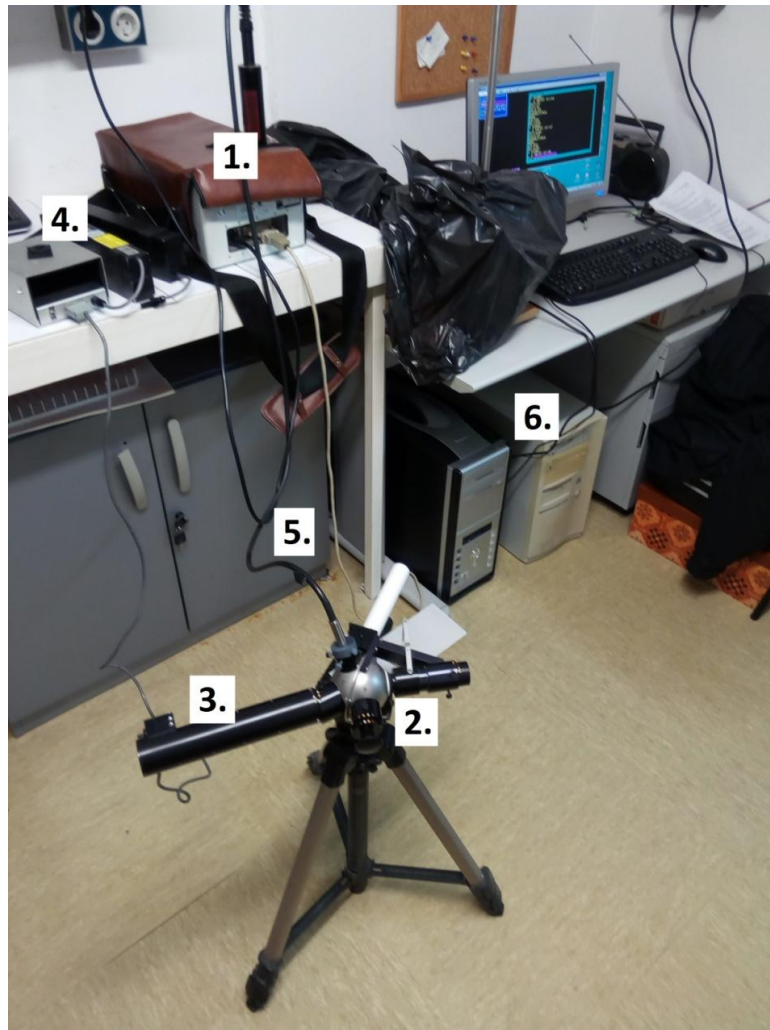


Figura 4.1.1 Espectrorradiómetro Licor LI-1800 [33]

En primer lugar, se debe enchufar el LI-1800 y el PC a la corriente. Después se conecta el LI-1800 con el PC a través del cable RS-232, se conecta una batería a la fuente de iluminación y, por último, se conecta el iluminador a la fuente.

Para la obtención de buenos resultados es recomendable encender la lámpara 30 segundos antes de tomar los datos, para que se estabilice, y moverla lo menos posible puesto que está compuesta por un filamento que vibra con facilidad. Es conveniente también, apagar la batería de la lámpara mientras no se use, de manera que aumente su durabilidad.

Respecto a la fibra óptica, si queremos obtener buenos resultados, se debe mantener lo más recta posible y, sobre todo, en una configuración parecida en todas las medidas.

La referencia estándar es la parte más delicada del equipo (cilindro blanco de la foto ensamblado en la esfera integradora). Es de fundamental importancia su conservación y su adecuada restauración ya que cuanto mayor sea la calidad de la referencia mayor será la calidad de las medidas.

- **Bases:**

El espectrorradiómetro LI-1800 está diseñado para obtener rápida y fácilmente datos del espectro de radiación. La esfera integradora recolecta la radiación que ha sido reflejada desde o transmitida a través del material muestra. El interior de la esfera está recubierto de un material reflectante y difuso (sulfato de bario) y tiene cinco entradas: los puertos A, B y C (convenientemente marcados en la esfera), el puerto de la fibra óptica y el de la referencia estándar.

El receptor de radiación (receptor coseno o fibra óptica) no está en el mismo plano que la fuente de iluminación o la muestra, sino que su campo de visión es la pared de la esfera integradora. El monocromador (dentro de la consola del LI-1800) tiene una serie de filtros en su entrada que al transmitir la radiación policromática la dispersa en sus componentes espectrales, es decir, la dispersa en estrechas bandas de frecuencias que son las que llegan al detector en el LI-1800.

El equipo es capaz de medir reflectividad en el espectro desde 400 nm hasta 1100 nm de longitud de onda cada 5 nm. Estos límites de medición son adecuados para nuestro estudio, ya que las diferentes tecnologías fotovoltaicas tienen una respuesta espectral (SR) muy pequeña por debajo de 400 nm y por encima de 1100 nm. En la realidad se obtendrá una reflexión ligeramente superior a la obtenida en este estudio pero la diferencia será pequeña.

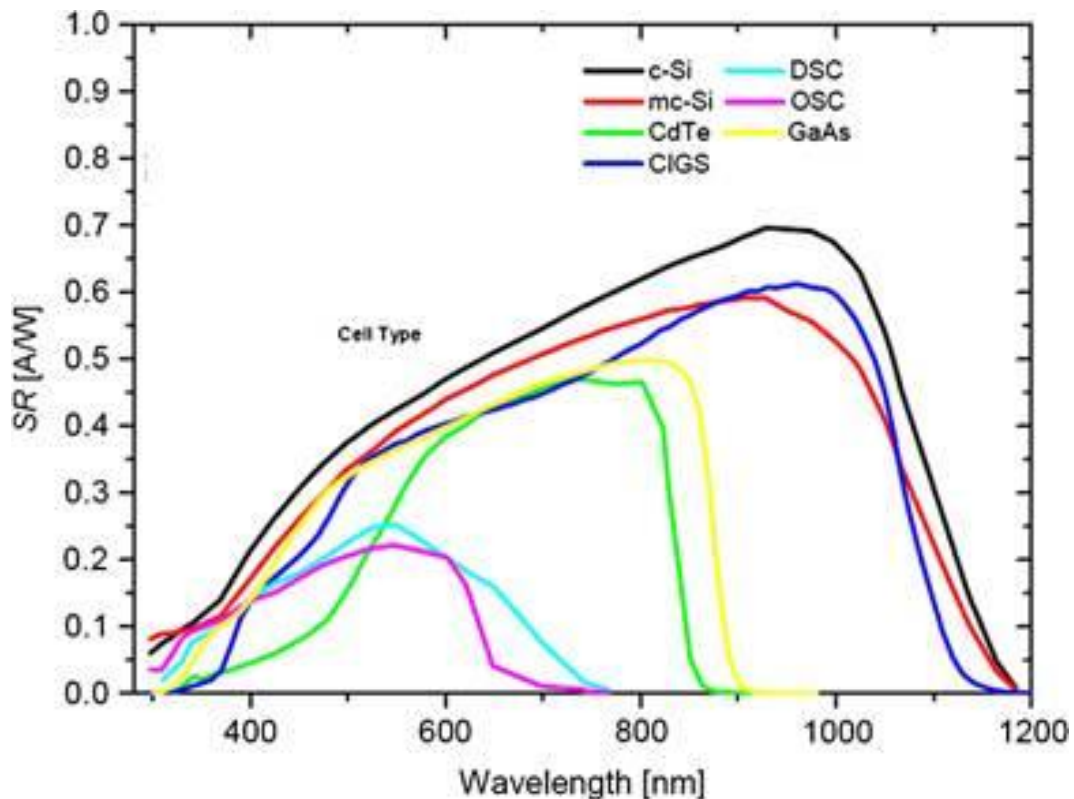


Figura 4.1.2 Respuesta Espectral por Tecnología I [26] [31]

Los archivos son creados en formato binario (.dat) y no pueden leerse, por lo que el programa los transforma a texto (.prn). Una vez generados los archivos en formato texto, se pueden exportar a Excel y generar tablas y gráficos.

Cuando la batería del iluminador se está agotando, suena un pitido como aviso.

Para realizar el ensayo de los diferentes materiales, la superficie que se desea medir debe estar mirando hacia el interior de la esfera integradora.

- **Mantenimiento:**

El LI-1800 requiere poco mantenimiento. Si el instrumento se usa en entornos donde el vapor de agua pueda condensarse dentro, los paquetes desecantes deberán secarse periódicamente.

Usar sólo alcohol o soluciones detergentes suaves para limpiar el exterior. Funcionalmente, el único punto que requiere limpieza es la superficie difusora. No usar disolventes fuertes o basados en petróleo.

Si se usa el instrumento en condiciones en las que pueda mojarse o exista pulverización, mantener el nivel del instrumento inclinado con el panel receptor hacia abajo. No permitir que el agua permanezca en los paneles, ya que podría dañar los conectores. El uso de la maleta con el final de la tapa cerrada con la cremallera hacia abajo sobre ambas caras protegerá el panel de la pulverización directa y protegerá la caja del instrumento del desgaste.

La caja blanca está precintada para mantener la limpieza interior. Con este fin, los puertos de entrada óptica estarán siempre cubiertos o con el receptor coseno instalado, incluida la junta. Limpiar el fondo de estos puntos antes de instalarlos pero mantener una delgada capa de grasa de silicona sobre la junta.

Los equipos motores no requerirán lubricación a menos que hayan sido limpiados, en cuyo caso, sólo una alta temperatura requiere el uso de grasa de baja volatilidad.

No es necesario realizar ningún ajuste mecánico.

Desecantes:

Dos paquetes desecantes se localizan en el interior del instrumento para mantener bajos niveles de humedad y prevenir la condensación cuando baja la temperatura.

Revisar que los paquetes desecantes aún muestran el color azul en sus ventanas. Si el color es pálido o rosa claro, secar el paquete en un horno 30 minutos a entre 150 y 170 grados centígrados y recolocarlos cuando se enfríe.

El desecante será comprobado antes de usarlo a temperaturas bajas o si las condiciones son favorables para la condensación dentro de la bolsa.

Fusibles:

La entrada de potencia AC está protegida con un fusible localizado en el receptáculo del centro superior del panel de conexiones trasero. El valor correcto para cualquiera de las dos líneas de voltaje seleccionadas es de 0.25 A, 250 V, 0.25*1.25 pulgadas, tales como AGC ¼.

Un fusible interno de 2ª se usa en el circuito de la batería y está localizado en el tablero suministrador de potencia. Un fusible fundido aquí indica un mal funcionamiento de un circuito o una conexión inadvertida del pin del conector con el puerto del terminal.

- Resultados

El ensayo de cada muestra se realizó dos veces con el objetivo de obtener datos más fiables y comprobar que no hubo ningún error en las medidas. En el caso concreto del cemento blanco, tenemos dos muestras distintas. Esto se debe a que la primera es de cemento blanco puro y la segunda es de cemento mezclado con un poco de arena para añadir resistencia a la mezcla, aunque también hace que se oscurezca ligeramente.



Figura 4.1.3 Ensayo del Aluminio Anodizado [33]



Figura 4.1.4 Ensayo del Cemento Blanco [33]

Los resultados numéricos de la reflectividad para cada longitud de onda y para cada material se pueden consultar en la tabla incluida en el anexo A. Estos datos se pueden ver con más claridad representándolos de manera gráfica:

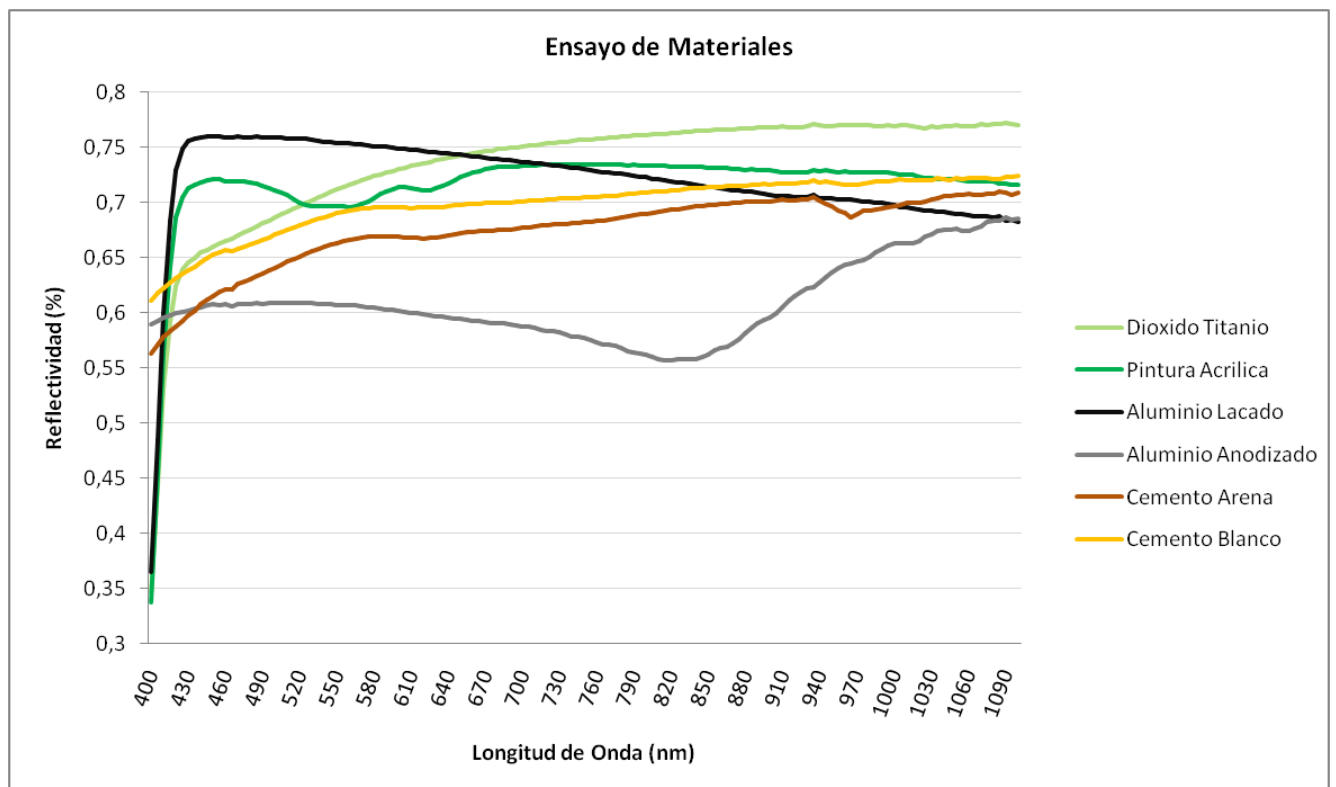


Figura 4.1.5 Ensayo de los Materiales [33]

4.2 Análisis de resultados

Máximos y mínimos:

Podemos observar que para longitudes de onda menores de 650 nm, el aluminio lacado es el mejor reflectante, mientras que para longitudes de onda mayores de 650 nm, el mejor reflectante es la pintura blanca de dióxido de titanio.

El aluminio anodizado está significativamente por debajo de los demás materiales en prácticamente todo el espectro analizado, por lo que sería el menos aconsejable.

El resto de materiales (pintura blanca acrílica, cemento blanco y cemento blanco con arena) se mueven en un rango de reflectividad similar, con variaciones menores al 5% en casi todo el rango.

Comparación entre materiales similares:

- **Metales:** El aluminio lacado está claramente muy por encima del aluminio anodizado en todo el rango.
- **Pinturas:** La pintura blanca de dióxido de titanio tiene una mayor reflectividad que la pintura blanca acrílica en todo el espectro excepto en el rango inicial que va desde 400nm a 525nm.
- **Cementos:** El cemento blanco puro está ligeramente por encima del mezclado con arena a lo largo de todo el rango, con una diferencia prácticamente constante de entre un 2% y un 4%.

Irradiancia reflejada por cada material:

Con los datos que ya tenemos de irradiancia solar y reflectividad en función de la longitud de onda se puede calcular cuál es la cantidad de radiación que refleja cada material y en qué espectro. No hay más que aplicar la siguiente fórmula para cada longitud de onda:

$$Irradiancia\ Reflejada\left(W/m^2\right)=Irradiancia\ Solar\left(W/m^2\right)*Reflectividad(\%)$$

La integral de esta función nos proporciona la radiación total en W/m^2 que es reflejada.

En el anexo B podemos encontrar las gráficas en las que se detalla la irradiancia reflejada y la integral de la irradiancia reflejada para cada longitud de onda.

Con los resultados obtenidos, podemos realizar un ranking según la mayor radiación reflejada:

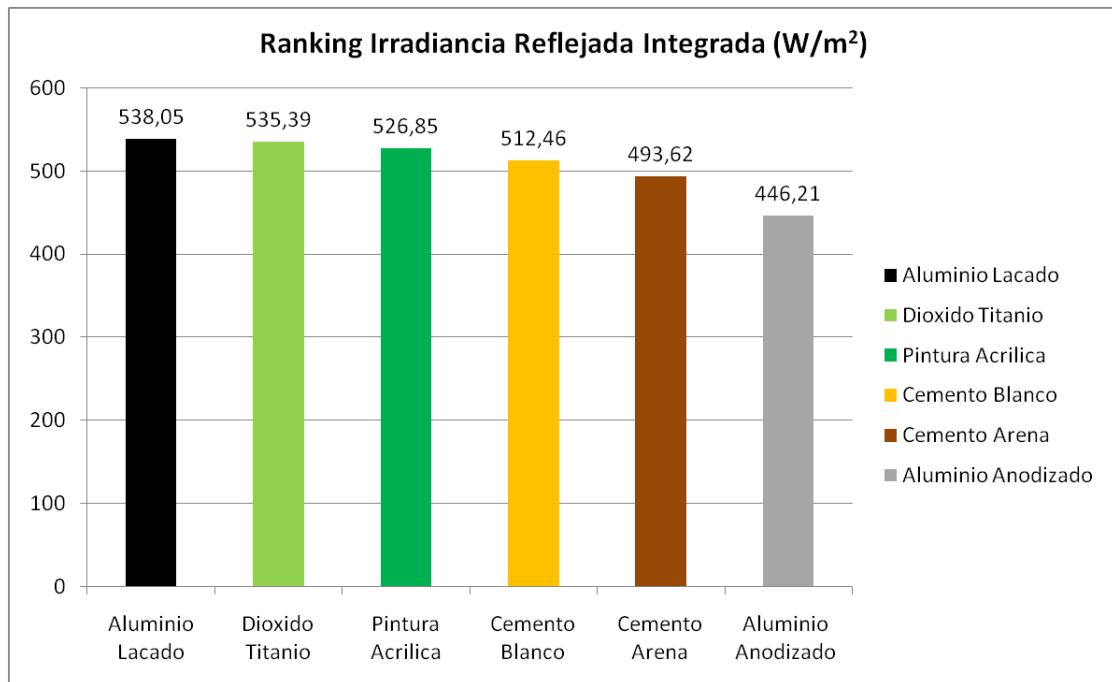


Figura 4.1.6 Ranking Irradiancia Reflejada Integrada [33]

El material que más radiación solar refleja es el aluminio lacado, seguido de cerca por la pintura blanca de dióxido de titanio. Por orden, los siguientes que más reflejan son la pintura blanca acrílica, el cemento blanco puro, el cemento blanco mezclado con arena y, por último, el aluminio anodizado.

El aluminio ocupa el mejor y el peor puesto entre los materiales estudiados. Esta diferencia se debe a los distintos acabados superficiales aplicados a cada muestra. El lacado es de color blanco, mientras que el anodizado es gris, lo cual hacía esperar ésta marcada diferencia. Modificaciones en el acabado superficial pueden conseguir grandes mejoras, ya que la reflectividad teórica máxima es bastante mayor que la alcanzada en el ensayo.

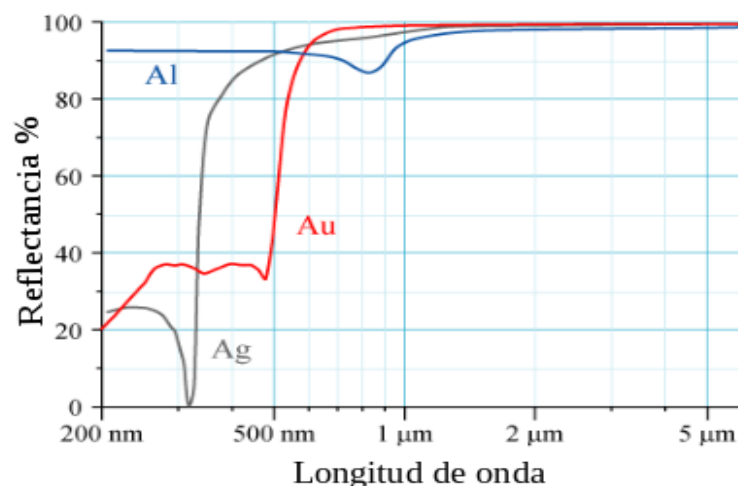


Figura 4.1.7 Reflectancia Espectral de algunos Metales [32]

Las pinturas demuestran tener una gran actuación en el rechazo de la energía radiante, colocándose detrás del aluminio lacado.

En el caso de los cementos, son capaces de reflejar un poco menos de energía, sobre todo el mezclado con arena, debido a su oscurecimiento. Esto pone de manifiesto la importancia de los agregados que se añaden, pues pueden variar mucho las propiedades tanto ópticas como mecánicas del mismo. Se puede mejorar mucho la actuación de los cementos, ya que las muestras ensayadas poseen una reflectividad baja comparada con los cementos actuales que, para ser considerados blancos por ley, deben tener un mínimo del 75% de albedo y, en nuestro caso, no se cumple.

Material óptimo para cada tecnología:

La cantidad de radiación global que refleja cada material es un buen indicador para aplicaciones como la reducción de temperatura de las superficies. Sin embargo, para la aplicación fotovoltaica resulta un dato incompleto, pues no tiene en cuenta el espectro de absorción de cada tecnología.

Para poder comparar los distintos materiales hay que hallar la cantidad de radiación que el panel es capaz de convertir en electricidad, cuantificada a través de la “respuesta espectral”, que es la cantidad de corriente de cortocircuito que se genera por cada unidad de potencia radiante recibida (A/W).

Partimos de la irradiancia reflejada, que debe ser multiplicada por la respuesta espectral para cada longitud de onda:

$$\text{Irradiancia Convertida} \left(\frac{A}{m^2} \right) = \text{Irradiancia Reflejada} \left(\frac{W}{m^2} \right) * \text{Respuesta Espectral} \left(\frac{A}{W} \right)$$

Con cada tecnología fotovoltaica se debe realizar este cálculo seis veces, es decir, una por material ensayado. Esto nos permite hallar el material que mejor se comporta para cada tipo de célula.

Es muy importante remarcar que, al utilizar la respuesta espectral, las unidades resultantes de la irradiancia convertida son $\left(\frac{A}{m^2} \right)$, diferentes a las unidades de la irradiancia reflejada y solar, $\left(\frac{W}{m^2} \right)$, con lo cual no podemos compararlas, pero sí un material con otro, que es el objetivo de este estudio.

A continuación se muestra el análisis de los resultados realizado para cada tecnología. Este sería el caso en el que la tecnología es fija y nos planteamos qué material sería el más favorable aplicar a nuestra superficie.

- **Silicio Monocristalino**

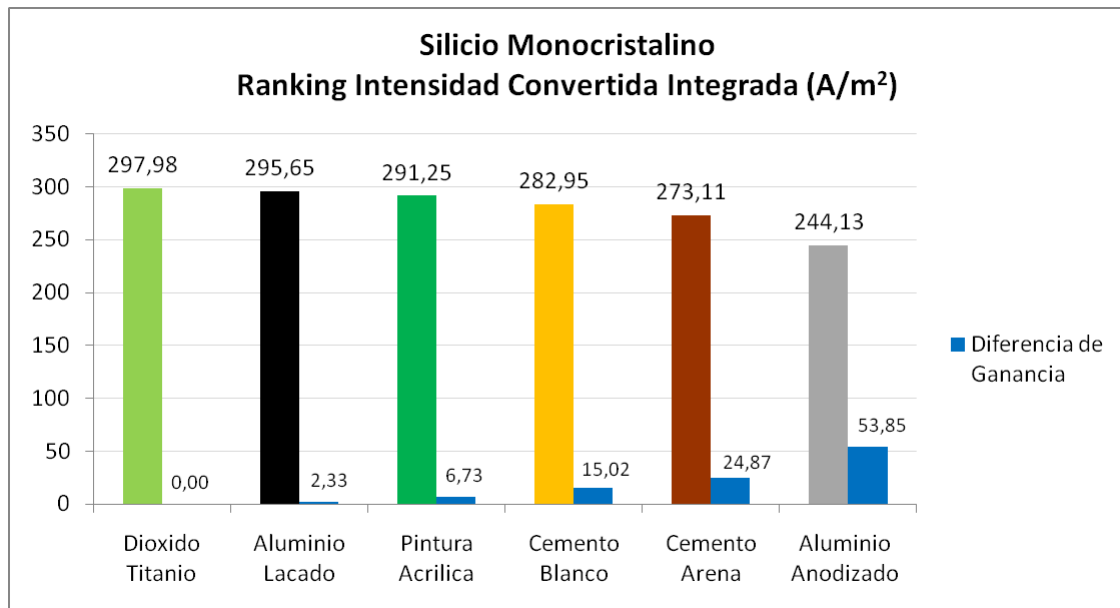


Figura 4.1.8 Silicio Monocristalino Ranking Intensidad Convertida Integrada [33]

Para la tecnología de silicio monocristalino, el material que mejor se adapta es la pintura blanca de dióxido de titanio, seguida de cerca por el aluminio lacado y la pintura blanca acrílica. El cemento blanco está en cuarta posición, con una diferencia de $15,02 A/m^2$ con respecto al mejor material. Esta diferencia aumenta considerablemente para el cemento blanco mezclado con arena ($24,87 A/m^2$) y para el aluminio anodizado ($53,85 A/m^2$), en última posición.

Es la tecnología en la que más influye la elección del material debido a que es la que tiene un mayor rendimiento. Cuanto menor es el rendimiento de la tecnología, menos afecta la elección de un material que no es el óptimo.

- **Silicio Policristalino**

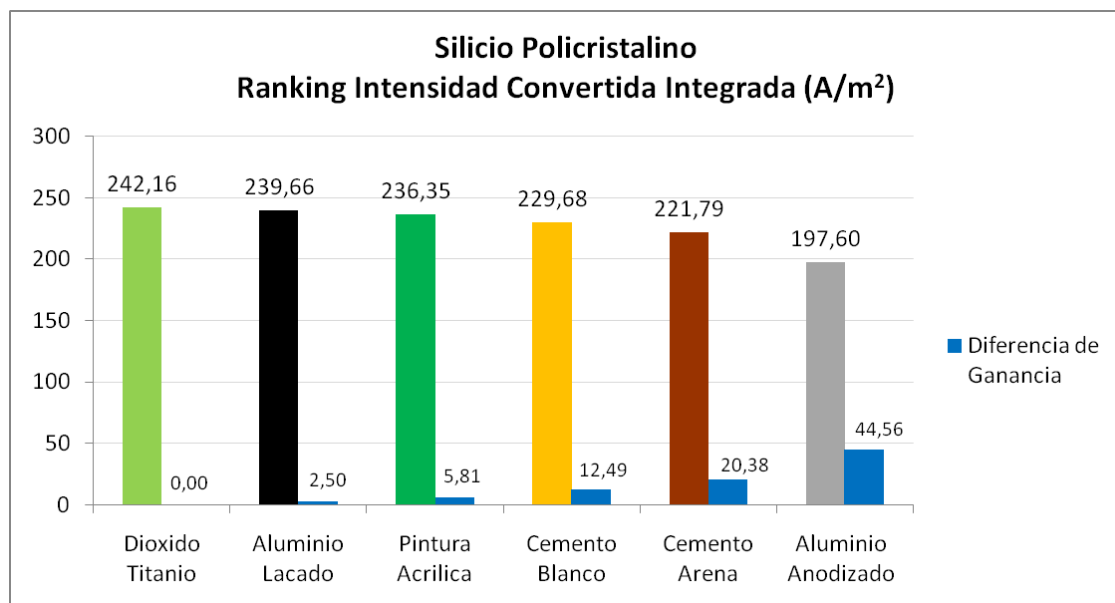


Figura 4.1.9 Silicio Policristalino Ranking Intensidad Convertida Integrada [33]

El material más recomendado para el silicio policristalino es también la pintura blanca de dióxido de titanio. Se conserva el mismo orden que para el silicio monocristalino, aunque en este caso las diferencias entre cada material y el de mejor actuación se reducen, excepto para el aluminio lacado, que aumenta ligeramente.

- **Silicio Amorfo**

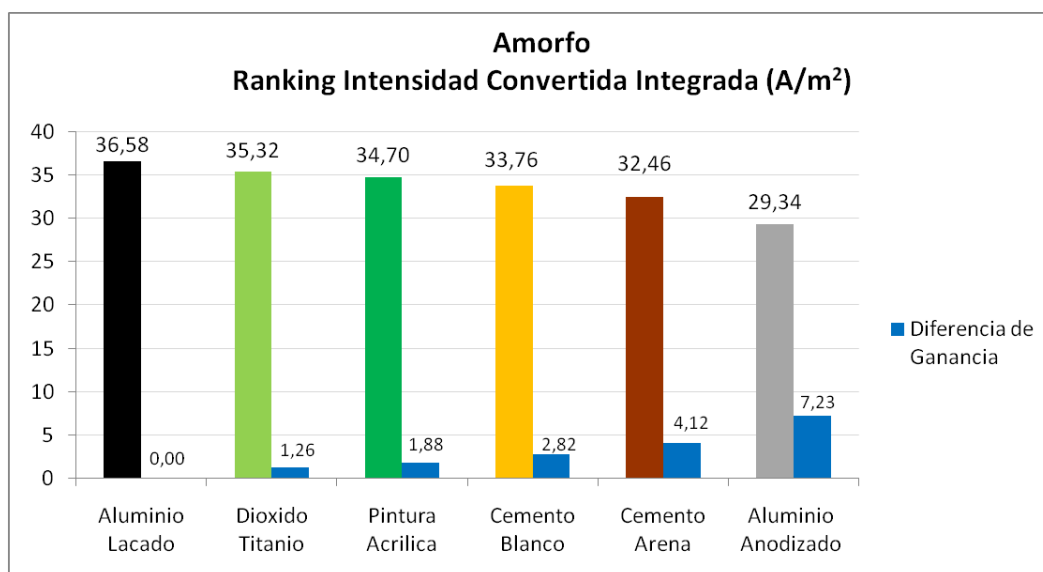


Figura 4.1.10 Silicio Amorfo Ranking Intensidad Convertida Integrada [33]

El aluminio lacado es el que mejor se adapta a la tecnología de silicio amorfo, dejando en segundo lugar a la pintura de dióxido de titanio, aunque con una diferencia de sólo $1.26 A/m^2$. Es la tecnología con menor rendimiento de las estudiadas, por lo que ninguno de los materiales alcanza una diferencia mayor de $7.23 A/m^2$. En la elección final del material, deberían tener más peso que la reflectividad, aspectos como el precio o la durabilidad.

- **CdTe**

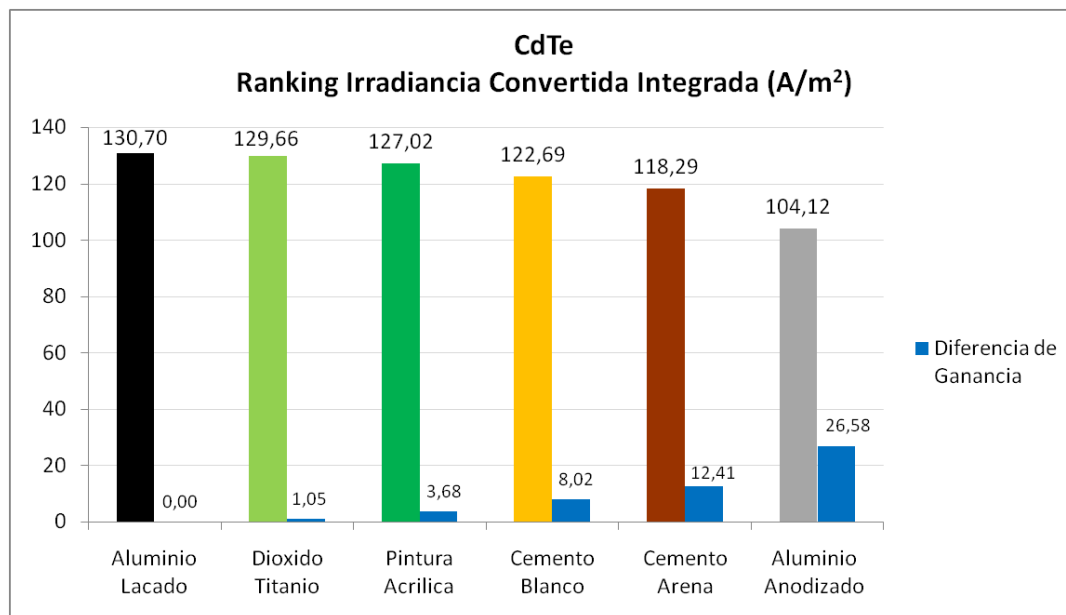


Figura 4.1.11 CdTe Ranking Intensidad Convertida Integrada [33]

En el caso de los paneles de teluro de cadmio, el aluminio lacado y la pintura de dióxido de titanio no tienen apenas diferencia ($1.05 A/m^2$). Los siguientes materiales van empeorando su actuación hasta llegar al aluminio anodizado que posee una diferencia de $26.58 A/m^2$ con el aluminio lacado.

Se encuentra en una posición intermedia entre el silicio amorfo y el resto de tecnologías en cuanto a su rendimiento global y la forma de su respuesta espectral. Por ello, a pesar de que el aluminio lacado es su material óptimo, la diferencia con la pintura blanca de dióxido de titanio es casi nula.

- CIGS

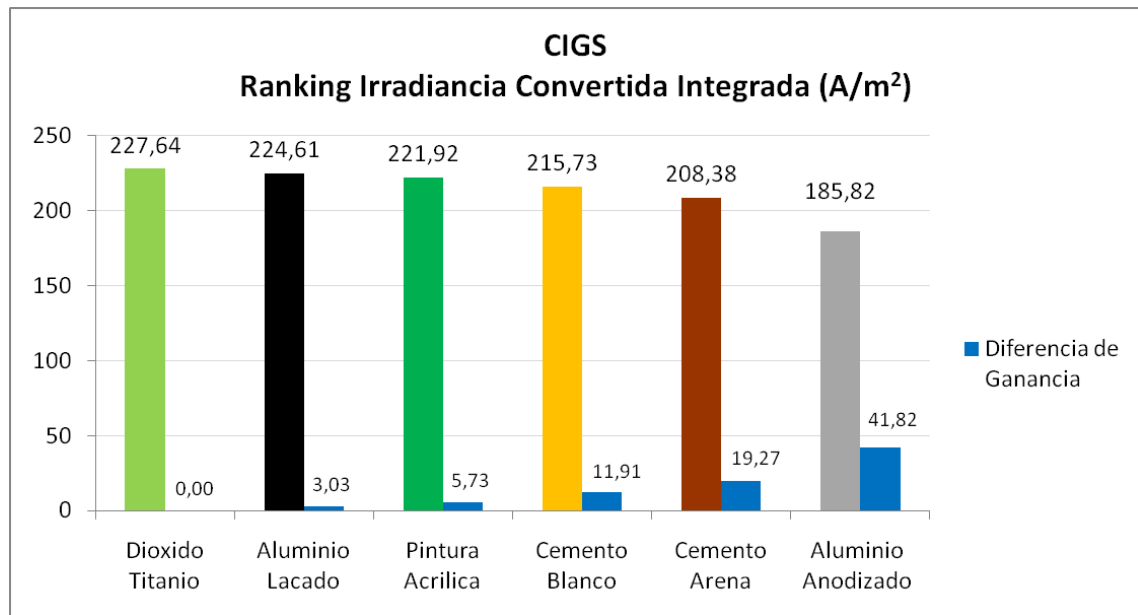


Figura 4.1.12 CIGS Ranking Intensidad Convertida Integrada [33]

En este último caso, la pintura de dióxido de titanio vuelve a obtener la mejor posición, dejando al aluminio lacado en segunda posición con una diferencia de 3.03 A/m². Los siguientes materiales empeoran la diferencia con el mejor hasta alcanzar los 41.82 A/m², un valor que hace que la selección del material ya tenga que ser más cuidadosa.

Con el CIGS se mantiene el mismo orden que con el monocristalino y con el silicio policristalino. Esto se debe a que las tres tecnologías son similares en cuanto a la forma de su respuesta espectral y la longitud de onda a la que tienen el máximo. Sus diferencias de ganancia, es decir, la producción que dejas de ganar por no elegir el material óptimo, también son parecidas en las tres tecnologías, debido a que tienen rendimientos globales similares.

Otro análisis interesante sería fijar el material de nuestra superficie y decidir qué tecnología es la más adecuada para un máximo aprovechamiento. Esto se cuantifica de igual forma a través de la intensidad convertida por el panel, integrada en todo el espectro electromagnético. La principal utilidad de esta comparación es la de cuantificar la diferencia de ganancia entre tecnologías. Así, podríamos decidir si la diferencia de precio o durabilidad del panel merece la pena o no. Por ejemplo, nos permitiría detectar que una tecnología produce el doble que otra pero, sin embargo, cuesta cuatro veces más.

- **Aluminio Lacado**

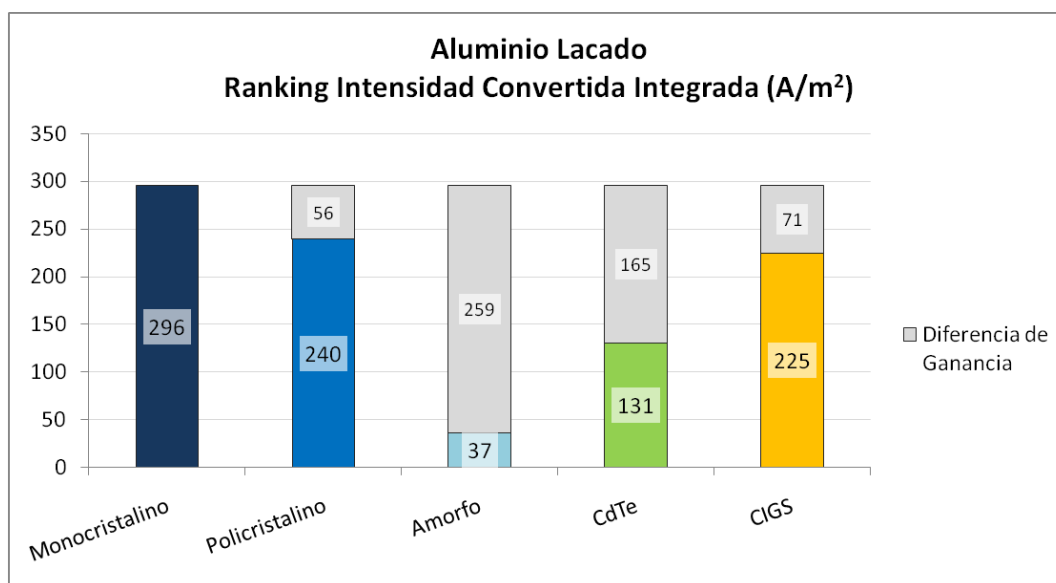


Figura 4.1.13 Aluminio Lacado Ranking Intensidad Convertida Integrada [33]

Para todos los materiales el orden de las tecnologías que más intensidad convierten es el mismo. Esto se debe a que entre el silicio monocristalino, el silicio policristalino, el silicio amorfo, el CdTe y el CIGS, existe una variación considerable de rendimiento, que se mantiene a pesar de las diferencias que incluyen los distintos materiales.

Sin embargo, la diferencia de ganancia entre el silicio monocristalino (el de mayor rendimiento) y las demás tecnologías sí varía según el material, ya que los espectros de absorción del panel y de reflexión de la superficie pueden ser más o menos coincidentes.

El aluminio lacado, por ejemplo, tiene una alta reflectividad en longitudes de onda cortas y una menor reflectividad en longitudes de onda larga, lo que favorece al silicio amorfo y perjudica al monocristalino, haciendo que la diferencia entre ambos sea menor que con otros materiales. Es el material que mejor se adapta a la respuesta espectral del silicio amorfo y, ligeramente en menor medida, al CdTe.

Es el caso en el que la elección del silicio amorfo estaría más justificada.

- **Pintura de Dióxido de Titanio**

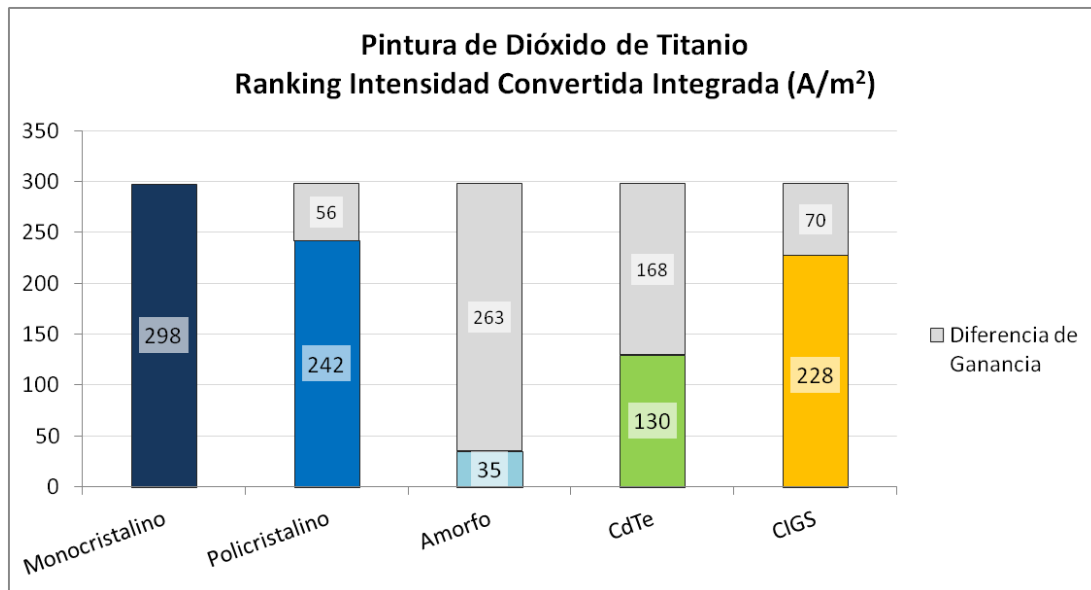


Figura 4.1.14 Pintura Dióxido Titanio Ranking Intensidad Convertida Integrada [33]

En el caso de la pintura de dióxido de titanio, ocurre lo contrario que con el aluminio lacado. Posee una reflectividad baja para longitudes de onda corta y alta para longitudes de onda larga, lo cual favorece al silicio monocristalino y perjudica al silicio amorfo, haciendo que la diferencia entre ambos sea la mayor de todos los materiales.

Cubriendo la superficie con esta pintura, lo óptimo sería elegir tecnologías con buena respuesta espectral en longitudes de onda larga, como son el silicio monocristalino, el silicio policristalino o el CIGS.

- **Pintura Acrílica**

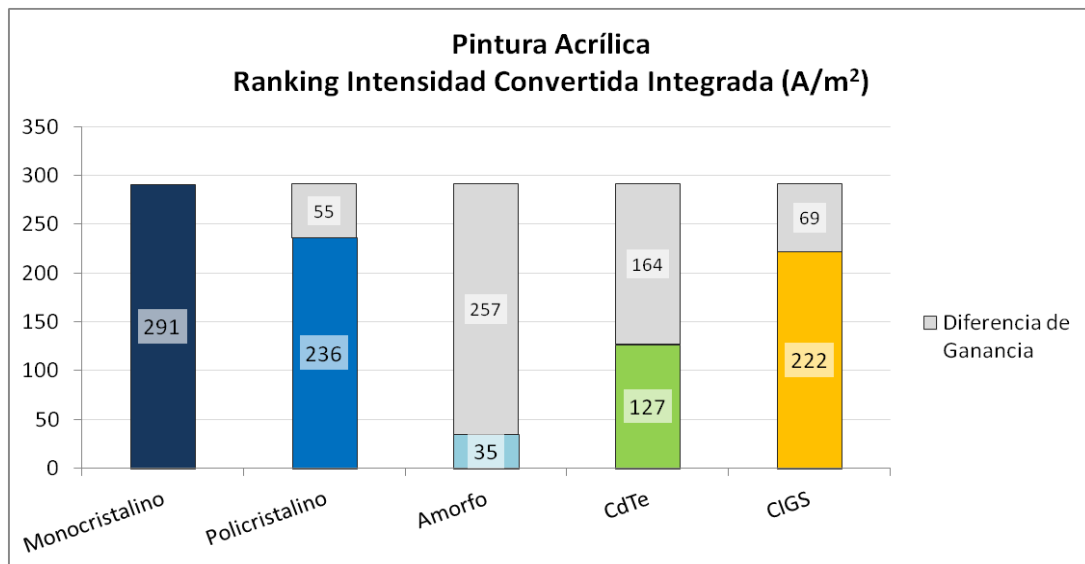


Figura 4.1.15 Pintura Acrílica Ranking Intensidad Convertida Integrada [33]

La pintura acrílica alcanza sus máximos en las longitudes de onda de 430 nm a 500 nm y después de 700 nm a 900 nm aproximadamente. A partir de ahí comienza a decrecer hasta los 1100 nm. Además tiene un descenso en su reflectividad entre los 700 nm y los 900 nm. Estos cambios hacen que siga bien la curva de absorción de todas las tecnologías en un rango, pero después no sean compatibles durante otro rango.

Por tanto, todas las tecnologías son igual de válidas, siendo las de mayor rendimiento las que más intensidad convertirían, como ocurre con todos los materiales.

- **Cemento Blanco**

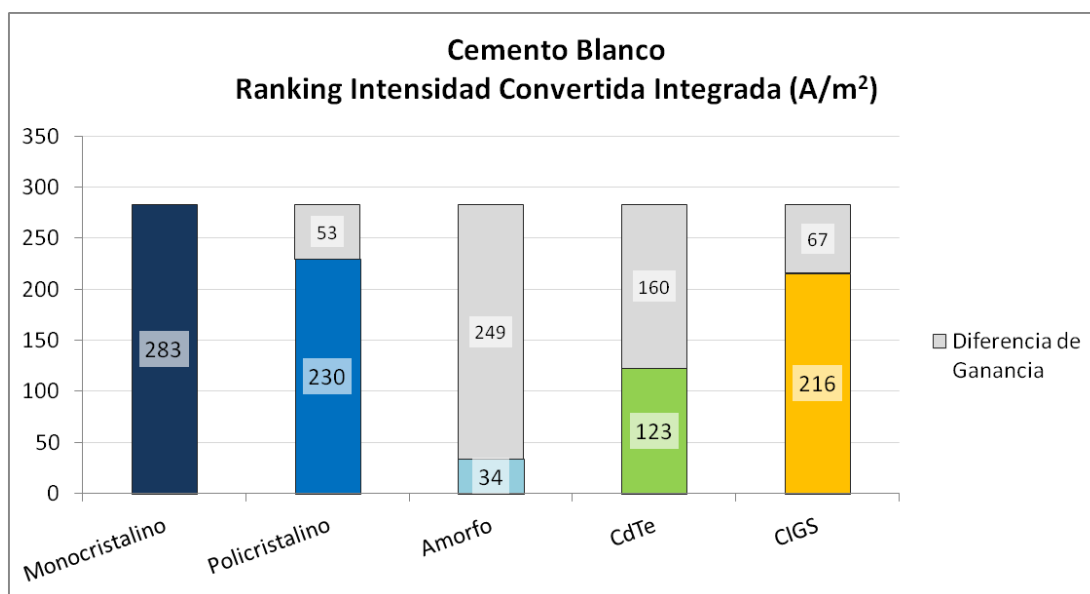


Figura 4.1.16 Cemento Blanco Ranking Intensidad Convertida Integrada [33]

El cemento blanco tiene un espectro de reflexión algo por debajo del de las pinturas y del aluminio lacado en la mayor parte del espectro estudiado. Este aumenta levemente hasta los 580 nm y después es bastante plano en el resto del rango.

Esto hace que todas las tecnologías se comporten de manera muy similar y no exista una que sea claramente más favorable.

- **Cemento Blanco con Arena**

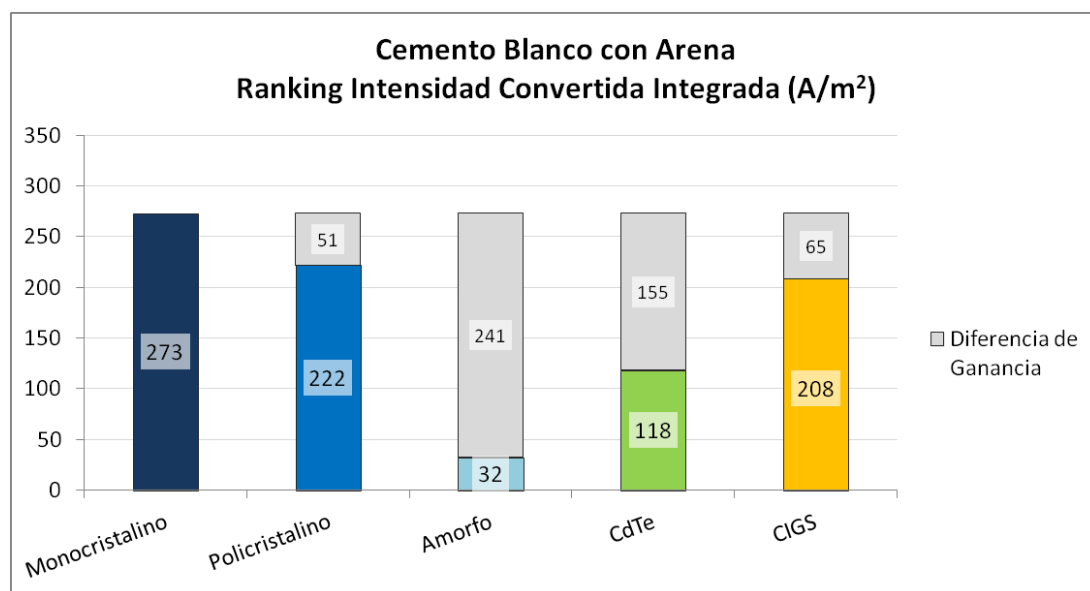


Figura 4.1.17 Cemento Blanco Arena Ranking Intensidad Convertida Integrada [33]

El cemento blanco mezclado con arena tiene un espectro de reflexión algo más bajo pero parecido en forma al cemento blanco puro. Las únicas diferencias son que se comporta ligeramente peor en longitudes de onda corta y que tiene un pequeño pico de bajada de tan solo 100 nm aproximadamente en la longitud de onda larga, con lo que ambos efectos se compensarían parcialmente y no habría una clara tecnología favorable.

- **Aluminio Anodizado**

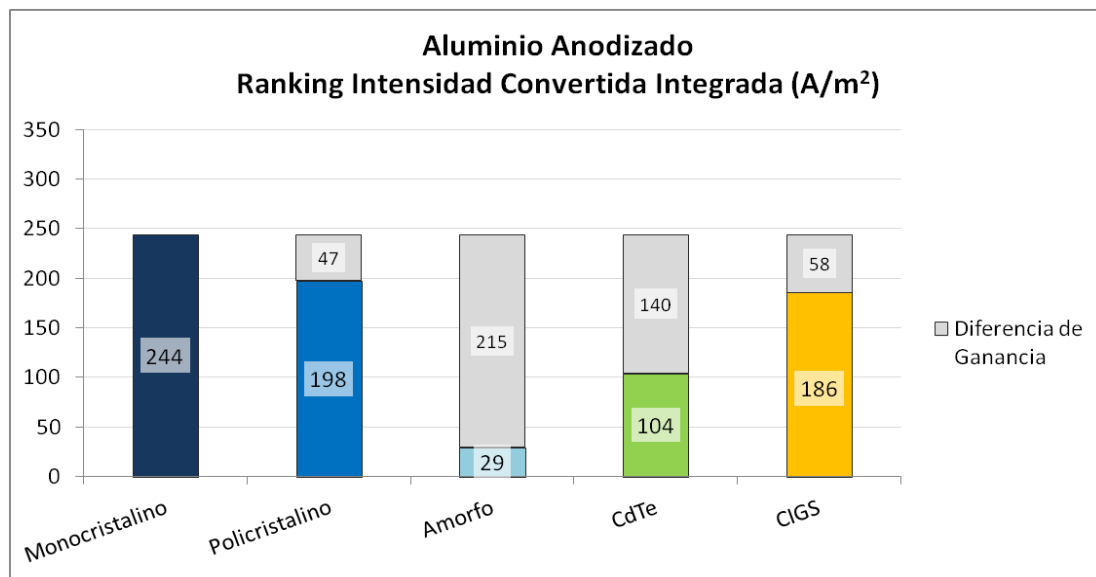


Figura 4.1.18 Aluminio Anodizado Ranking Intensidad Convertida Integrada [33]

El aluminio anodizado, como ya hemos visto, es el que tiene peor comportamiento. Su espectro de reflexión está siempre muy por debajo del resto, especialmente en las longitudes de onda corta. En el último tramo de longitudes de onda larga, su reflectividad sube bruscamente, aunque se mantiene por debajo de los demás materiales.

Esto favorece un poco a las tecnologías de silicio monocristalino, silicio policristalino y CIGS pero, como balance general, no es un material que funcione bien con ningún tipo de panel.

Conclusiones del análisis:

La pintura blanca de dióxido de titanio y el aluminio lacado ocupan la primera o la segunda posición en el ranking de energía radiante convertida por el panel para las cinco tecnologías estudiadas, con una diferencia mínima entre ellos, entre 1.05 A/m^2 y 3.03 A/m^2 .

El resto de materiales mantienen siempre el mismo orden: pintura blanca acrílica en tercera posición (diferencia entre 1.88 y 6.73 A/m^2 con la mejor opción), cemento blanco en cuarta (diferencia entre 2.82 y 15.02 A/m^2), cemento blanco con arena en quinta (diferencia entre 4.12 y 24.87 A/m^2) y aluminio anodizado en sexta posición (diferencia entre 7.23 y 53.85 A/m^2).

El orden de las tecnologías que más intensidad convierten es el mismo para todos los materiales debido a la diferencia de rendimiento global entre las tecnologías. Es decir, algunas tecnologías no tienen la forma de la curva de respuesta espectral óptima pero, aún así, esta curva está por encima de otra que sí tienen una forma más adecuada.

La diferencia de energía convertida, entre cada material y el material óptimo, se hace mayor cuanto más alto es el rendimiento de la tecnología fotovoltaica. Esto quiere decir que cuanto mayor es el rendimiento del panel, más cuidadoso se debe ser a la hora de seleccionar el material reflectante. Como ejemplo, para el silicio amorfo sólo se dejarían de ganar 7.23 A/m^2 al seleccionar el aluminio anodizado, que es la peor opción desde el punto de vista óptico, haciendo que los factores determinantes en la elección del material sean otros, tales como el precio o la durabilidad.

La variación en el material modifica ligeramente el espectro de radiación que llega al panel, haciendo que materiales con mayor reflectividad en el rango de longitudes de onda corta (aluminio lacado y pintura blanca acrílica), sean más compatibles con el silicio amorfo y el CdTe; y materiales con mayor reflectividad en longitudes de onda larga(pintura blanca de dióxido de titanio, cementos y aluminio anodizado), sean más compatibles con el silicio monocristalino, silicio policristalino y CIGS.

La mejor combinación de todas es tener un panel de silicio monocristalino y una superficie con pintura blanca de dióxido de titanio, lo que obtendría una intensidad convertida integrada de 298 A/m^2 .

5 CONCLUSIONES

La energía fotovoltaica urbana es ya una realidad en algunos lugares del mundo y se prevé que en el futuro sufra un gran desarrollo a escala global. Su generalización tendría grandes beneficios como el aumento de la generación renovable, la disminución de la contaminación, la mejora de la salud de los ciudadanos, el fomento del empleo local, el desarrollo regional y la mejora del acceso a la energía, entre otros. Además, la utilización de superficies altamente reflectantes tendría otros efectos secundarios favorables, como son la reducción de demanda de refrigeración, el aumento de la vida útil de los elementos y el mejor aprovechamiento de la luz natural en el interior de los edificios.

Este proyecto tiene como objetivo comparar diferentes materiales característicos de la construcción para averiguar cual puede favorecer más la integración fotovoltaica en la edificación. Se buscan materiales con una alta capacidad de reflexión que haga que los paneles reciban, además de la radiación incidente, la reflejada por las superficies cercanas, provocando una mayor generación a un bajo coste.

Cada tecnología fotovoltaica tiene un espectro de absorción distinto, es decir, podría tener asociada un material reflectante óptimo diferente. Esto es importante porque los fotones que no son absorbidos calientan el panel, provocando el efecto no deseado de reducir su rendimiento. También se debe tener en cuenta que la concentración de radiación no sea excesivamente alta, ya que llega un punto en el que el efecto negativo del aumento de temperatura pesa más que el efecto positivo del aumento de radiación. Este punto es característico de cada tecnología fotovoltaica y de la calidad de fabricación.

Los materiales reflectantes deben cumplir unos requisitos de reflectividad espectral, emisividad, durabilidad, coste, disponibilidad e información. Ya existen materiales con variedad de tonos que pueden tener un buen desempeño en esta aplicación, lo que los hace comercialmente más atractivos, y que se pueden adquirir a un coste similar a los tradicionales. Es muy importante su caracterización y catalogación, de manera que los responsables de desarrollo de las distintas regiones puedan impulsar la utilización de estos materiales.

Los materiales estudiados en este proyecto han sido:

- Aluminio Lacado
- Aluminio Anodizado
- Pintura Blanca de Dióxido de Titanio
- Pintura Blanca Acrílica
- Cemento Blanco

La caracterización de sus espectros de reflexión ha sido posible gracias al espectrorradiómetro *Licor LI-1800*, capaz de cuantificar la reflectividad para cada longitud de onda.

Todas las tecnologías tienen la tendencia general de presentar poca diferencia entre los tres mejores materiales reflectantes e ir incrementando progresivamente esta diferencia con los tres siguientes. El orden es prácticamente idéntico en todas las tecnologías (pintura blanca de dióxido de titanio, aluminio lacado, pintura

blanca acrílica, cemento blanco puro, cemento blanco con arena y aluminio anodizado), con la única variación en el primer y segundo puesto, siempre por poca diferencia.

Cuanto mayor sea el rendimiento de la tecnología fotovoltaica, más cuidadoso se debe ser a la hora de seleccionar el material a aplicar sobre la superficie reflectante, ya que tendrá un efecto mayor.

Como conclusión general, podemos decir que el aluminio anodizado favorece ligeramente las tecnologías de silicio monocristalino, silicio policristalino y CIGS. Sin embargo, se muestra como la peor opción para todas las tecnologías por tener una baja reflectividad en todo el rango de longitudes de onda estudiado. Esto pone de manifiesto la tremenda importancia que tiene el acabado superficial de los materiales y su potencial de desarrollo y perfeccionamiento.

Las pinturas blancas tienen un magnífico resultado para todas las tecnologías como reflectantes, tanto la acrílica como la de dióxido de titanio, ambas a un coste muy bajo. La pintura blanca de dióxido de titanio es la que más favorece al silicio monocristalino, silicio policristalino y CIGS, mientras que la pintura blanca acrílica, no tiene una tecnología a la que favorezca claramente.

De este mismo orden de bondad es el aluminio lacado. Es el que tiene la forma de la curva de reflexión más compatible con el silicio amorfo. Tiene una emisividad más baja por ser metálico pero es una característica que no afecta en exceso al resultado final. Su elección frente a las pinturas dependerá de los factores de durabilidad, coste, disponibilidad e información.

Los cementos tienen una reflectividad ligeramente inferior pero, a cambio, tiene una durabilidad extraordinariamente superior. No favorecen especialmente a ninguna tecnología. Debemos remarcar el gran efecto de los agregados del cemento, que pueden cambiar totalmente sus propiedades, haciendo de este un campo con grandes posibilidades de mejora.

6 LÍNEAS DE TRABAJO FUTURO

1. Creación de una **Base de Datos** de materiales “fríos” y altamente reflectantes, en la que se pueda encontrar información detallada sobre sus propiedades.
2. **Mejora** en las **Propiedades** de los materiales: reflectividad, durabilidad, disponibilidad y coste.
3. **Fomento** de los **Materiales Reflectantes**, no sólo como impulsores de la generación solar urbana sino también como medida de ahorro y eficiencia en la demanda de refrigeración.

7 BIBLIOGRAFÍA

1. CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas). *Curso de Caracterización de la Radiación Solar como Recurso Energético*. España: Ministerio de Ciencia e Innovación.
2. CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas). *Fundamentos, Dimensionado y Aplicaciones de la Energía Solar Fotovoltaica*. España: Ministerio de Ciencia e Innovación y Universidad Politécnica de Madrid.
3. LILLO BRAVO, I. *Asignatura de Instalaciones Fotovoltaicas*. Sevilla: Escuela Técnica Superior de Ingeniería, Universidad de Sevilla, 2014-2015
4. VALERO, C. Láminas de materiales reflectantes para cultivos. En: *Horticultura Internacional*. Mayo 2003, no 40, pp. 36-41
5. ALCHAPAR, N.L., CORREA, E.N., CANTÓN, M.A. Índice de reflectancia solar de revestimientos verticales: potencial para la mitigación de la isla de calor urbana. En: *Ambiente Construído*. Porto Alegre, Brasil: jul./set. 2012, v. 12, n. 3, p. 107-123. ISSN 1678-8621
6. CARRERAS RUFIN, E. *Hacia un rascacielos ecoeficiente. Estudio sobre la sostenibilidad medioambiental del edificio en altura y su aplicación en Barcelona y Madrid*. Cataluña: Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, 2012
7. IEA (International Energy Agency). *Energy and Climate Change, World Energy Outlook Special Report*. Paris: IEA, June 2015
8. CONSEJERÍA DE EMPLEO, EMPRESA Y COMERCIO. *Estrategia Energética de Andalucía 2020*. Andalucía: Junta de Andalucía, 2015
9. PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo). *Informe sobre Desarrollo Humano 2015*. Nueva York: Naciones Unidas, 2015
10. IEA (International Energy Agency). *Key World Energy Statistics*. Paris: IEA, November 2015
11. BRETZ, S., AKBARI, H., ROSENFELD, A. and TAHA, H. *Implementation of solar-reflective surfaces: Materials and utility programs*. California: Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, 1992

12. GARCIA PASCUA, N., SÁNCHEZ de ROJAS, M. I. y FRÍAS, M. Medidas de color en diferentes materiales de construcción. La restauración en edificios de arenisca. En: *Materiales de Construcción*. España: CSIC, enero/febrero/marzo 1999, Vol. 49, nº 253
13. CARRASCO ALDUNATE, C. *Análisis de la forma espacial y materiales como modeladores del microclima de tejidos urbanos mediterráneos costeros. El caso de la ciudad de Valparaíso*. Valparaíso, Barcelona: Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, 2008
14. BRETZ, S., AKBARI, H. and ROSENFELD, A. Practical issues for using solar-reflective materials to mitigate urban heat islands. En: *Atmospheric Environment*. Berkeley, California: Lawrence Berkeley Laboratory, 1998, Vol. 32, No. 1, pp. 95 101
15. AKBARI, H., LEVINSON, R. and BERDAHL, P. *ASTM Standards for Measuring Solar Reflectance and Infrared Emittance of Construction Materials and Comparing their Steady-State Surface Temperatures*. Berkeley, California: Lawrence Berkeley Laboratory.
16. AKBARI, H., BERDAHL, P., LEVINSON, R. and WIEL, S. *Cool Color Roofing Materials*. Berkeley, California: Lawrence Berkeley Laboratory, February 2006
17. Ficha Técnica del modulo fotovoltaico KD70SX-1P
18. FRAUNHOFER ISE (Institute for Solar Energy Systems). *Photovoltaics Report*. Freiburg: 17 November 2015
19. NREL (National Renewable Energy Laboratory). *2014 Renewable Energy Data Book*. U.S. Department of Energy, November 2015
20. SENTHILARASU, S., FERNÁNDEZ, E.F., ALMONACID, F. and MALLICK, K. Effects of spectral coupling on perovskite solar cells under diverse climatic conditions. En: *Solar Energy Materials & Solar Cells*. Elsevier: 21 November 2014
21. SCHWEIGER, M., JAHN, U. y HERRMANN, W. *Spectral analysis of various thin film modules using high precision spectral response data and solar spectral irradiance data*. Köln, Germany: TÜV Rheinland Energie, 2012
22. BALENZATEGUI MANZANARES, J.L. *Fundamentos de la conversión fotovoltaica: La célula solar*. EOI, Máster en Energías Renovables y Mercado Energético, 2007/2008
23. CAMPOS, J. y MATSUMOTO, Y. *Técnicas para la evaluación de celdas solares (norma IEC, JIS, UL)*.
24. GREEN, M.A., EMERY, K., HISHIKAWA, Y., WARTA, W. and DUNLOP, E.D. Solar cell efficiency tables (version 46). En: *Progress in photovoltaics: Research and applications*. 2015, no. 23, pp. 805-812
25. Technical Note: *Spectral Characterisation of Photovoltaic Devices*, Bentham
26. FRAUNHOFER ISE (Institute for Solar Energy Systems). *Fraunhofer ISE CalLab PV Cells changes to new spectral distribution in IEC 60904-3 standard*.
27. JANKI, S., BAUMGARTNER, F.P., MEIER, J., HUEGLI, A. and BÚCHEL, A. Spectral photocurrent measurement techniques for thin film modules. En: *19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Paris, France, 7-11 June 2004
28. BIRD, R.E. and HULSTROM, R.L. Terrestrial solar spectral data sets. En: *Solar Energy*. Great Britain: 1983, Vol. 30, No. 6, pp. 563-573

29. SOLANO LAMPHAR, H.A., *Medición de la Contaminación Lumínica en Espacios Naturales. Propuesta de un modelo predictivo*. Barcelona: Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Cataluña, 2010
30. PVEDUCATION.ORG: A collection of resources for the photovoltaic educator. [consulta: 12 Junio 2016] Disponible en: <http://pveducation.org/>
31. PVPerformance: Modeling Collaborative. [consulta: 12 Junio 2016] Disponible en: <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/2-dc-module-iv/effective-irradiance/spectral-mismatch/>
32. Richardson Gratings. Compañía de diseño, producción y caracterización de rejillas de difracción para instrumentación analítica. [consulta: 12 Junio 2016] Disponible en: http://www.gratinglab.com/Information/Technical_Data/Coating_Reflectivity.pdf
33. Elaboración propia

Glosario

IDH: Índice de Desarrollo Humano	3
PNUD: Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo	3
SRI: Índice de Reflectancia Solar	9
MEG: Multiple Excitation Generation	25
EQE: External Quantum Efficiency	26
IQE: Internal Quantum Efficiency	26
FF: Factor de Forma	30
RE: Respuesta Espectral	68

Anexo A

λ (nm)	Pintura Acrílica	Aluminio Lacado	Aluminio Anodizado	Dióxido Titanio	Cemento Arena	Cemento Blanco
400	0,3378	0,3646	0,5897	0,3468	0,5632	0,6105
405	0,4536	0,4850	0,5924	0,4444	0,5712	0,6179
410	0,5631	0,5999	0,5953	0,5312	0,5777	0,6215
415	0,6414	0,6829	0,5971	0,5909	0,5832	0,6272
420	0,6858	0,7290	0,5996	0,6241	0,5876	0,6308
425	0,7044	0,7486	0,6004	0,6388	0,5927	0,6347
430	0,7124	0,7554	0,6020	0,6451	0,5974	0,6381
435	0,7153	0,7575	0,6035	0,6497	0,6018	0,6417
440	0,7175	0,7587	0,6051	0,6543	0,6074	0,6458
445	0,7196	0,7595	0,6065	0,6563	0,6114	0,6495
450	0,7205	0,7596	0,6072	0,6595	0,6150	0,6521
455	0,7207	0,7593	0,6068	0,6625	0,6187	0,6545
460	0,7191	0,7585	0,6075	0,6648	0,6210	0,6562
465	0,7192	0,7589	0,6060	0,6664	0,6211	0,6551

470	0,7190	0,7592	0,6075	0,6701	0,6255	0,6579
475	0,7188	0,7591	0,6076	0,6724	0,6285	0,6600
480	0,7175	0,7590	0,6078	0,6748	0,6299	0,6621
485	0,7164	0,7595	0,6086	0,6781	0,6333	0,6640
490	0,7145	0,7590	0,6081	0,6811	0,6354	0,6656
495	0,7131	0,7585	0,6090	0,6836	0,6382	0,6680
500	0,7108	0,7584	0,6090	0,6862	0,6407	0,6705
505	0,7088	0,7581	0,6090	0,6890	0,6432	0,6726
510	0,7062	0,7576	0,6086	0,6917	0,6461	0,6746
515	0,7029	0,7576	0,6087	0,6941	0,6484	0,6770
520	0,6998	0,7573	0,6088	0,6965	0,6508	0,6795
525	0,6977	0,7572	0,6086	0,6994	0,6533	0,6815
530	0,6964	0,7561	0,6085	0,7018	0,6551	0,6830
535	0,6961	0,7555	0,6079	0,7044	0,6577	0,6849
540	0,6966	0,7549	0,6077	0,7068	0,6598	0,6866
545	0,6965	0,7543	0,6076	0,7094	0,6619	0,6881
550	0,6967	0,7539	0,6070	0,7114	0,6632	0,6900
555	0,6962	0,7535	0,6069	0,7140	0,6648	0,6908
560	0,6958	0,7531	0,6068	0,7159	0,6659	0,6926
565	0,6965	0,7526	0,6064	0,7181	0,6671	0,6933
570	0,6979	0,7522	0,6055	0,7198	0,6680	0,6940
575	0,7008	0,7516	0,6048	0,7218	0,6687	0,6948
580	0,7040	0,7509	0,6043	0,7236	0,6687	0,6951
585	0,7072	0,7504	0,6038	0,7252	0,6691	0,6952
590	0,7101	0,7501	0,6031	0,7268	0,6690	0,6954
595	0,7122	0,7492	0,6026	0,7283	0,6685	0,6956
600	0,7137	0,7489	0,6013	0,7299	0,6684	0,6952
605	0,7136	0,7479	0,6007	0,7314	0,6677	0,6949

610	0,7130	0,7474	0,5998	0,7327	0,6674	0,6948
615	0,7115	0,7471	0,5993	0,7343	0,6674	0,6951
620	0,7108	0,7464	0,5985	0,7354	0,6673	0,6951
625	0,7109	0,7457	0,5974	0,7365	0,6678	0,6953
630	0,7126	0,7453	0,5968	0,7378	0,6683	0,6955
635	0,7148	0,7447	0,5966	0,7390	0,6686	0,6958
640	0,7172	0,7441	0,5952	0,7404	0,6694	0,6965
645	0,7199	0,7435	0,5949	0,7414	0,6704	0,6971
650	0,7226	0,7428	0,5944	0,7423	0,6715	0,6977
655	0,7250	0,7425	0,5938	0,7434	0,6724	0,6983
660	0,7271	0,7418	0,5925	0,7443	0,6731	0,6984
665	0,7285	0,7410	0,5924	0,7452	0,6737	0,6988
670	0,7299	0,7407	0,5918	0,7461	0,6742	0,6990
675	0,7306	0,7397	0,5908	0,7468	0,6742	0,6995
680	0,7316	0,7395	0,5899	0,7479	0,6747	0,6994
685	0,7319	0,7386	0,5900	0,7485	0,6750	0,6994
690	0,7325	0,7383	0,5893	0,7491	0,6755	0,6998
695	0,7326	0,7376	0,5882	0,7498	0,6760	0,7001
700	0,7329	0,7366	0,5872	0,7506	0,6765	0,7003
705	0,7333	0,7362	0,5869	0,7515	0,6773	0,7012
710	0,7335	0,7354	0,5858	0,7518	0,6781	0,7014
715	0,7336	0,7347	0,5844	0,7529	0,6789	0,7017
720	0,7337	0,7341	0,5834	0,7534	0,6791	0,7023
725	0,7338	0,7331	0,5829	0,7539	0,6797	0,7027
730	0,7337	0,7326	0,5819	0,7544	0,6803	0,7034
735	0,7340	0,7321	0,5800	0,7547	0,6803	0,7035
740	0,7336	0,7312	0,5785	0,7556	0,6807	0,7035
745	0,7340	0,7307	0,5777	0,7564	0,6815	0,7039

750	0,7338	0,7298	0,5771	0,7566	0,6821	0,7042
755	0,7340	0,7291	0,5755	0,7568	0,6826	0,7043
760	0,7341	0,7281	0,5729	0,7576	0,6829	0,7047
765	0,7337	0,7275	0,5713	0,7580	0,6836	0,7052
770	0,7341	0,7266	0,5706	0,7585	0,6846	0,7054
775	0,7341	0,7262	0,5701	0,7588	0,6855	0,7057
780	0,7339	0,7255	0,5676	0,7596	0,6859	0,7065
785	0,7336	0,7247	0,5653	0,7597	0,6870	0,7072
790	0,7337	0,7240	0,5635	0,7602	0,6881	0,7076
795	0,7333	0,7232	0,5627	0,7608	0,6891	0,7082
800	0,7332	0,7224	0,5621	0,7611	0,6893	0,7087
805	0,7331	0,7213	0,5601	0,7616	0,6906	0,7093
810	0,7329	0,7204	0,5575	0,7617	0,6910	0,7095
815	0,7330	0,7195	0,5566	0,7621	0,6919	0,7100
820	0,7325	0,7188	0,5568	0,7626	0,6931	0,7106
825	0,7322	0,7181	0,5581	0,7631	0,6931	0,7110
830	0,7322	0,7176	0,5579	0,7633	0,6940	0,7114
835	0,7321	0,7164	0,5572	0,7637	0,6953	0,7123
840	0,7321	0,7156	0,5574	0,7643	0,6959	0,7123
845	0,7317	0,7151	0,5593	0,7645	0,6966	0,7128
850	0,7315	0,7140	0,5620	0,7650	0,6971	0,7135
855	0,7314	0,7139	0,5657	0,7653	0,6974	0,7136
860	0,7311	0,7127	0,5675	0,7656	0,6985	0,7140
865	0,7306	0,7116	0,5691	0,7660	0,6985	0,7146
870	0,7298	0,7111	0,5724	0,7658	0,6994	0,7148
875	0,7299	0,7107	0,5761	0,7669	0,6992	0,7151
880	0,7293	0,7099	0,5814	0,7668	0,7000	0,7148
885	0,7298	0,7098	0,5867	0,7668	0,7006	0,7156

890	0,7293	0,7086	0,5905	0,7674	0,7004	0,7161
895	0,7290	0,7078	0,5930	0,7677	0,7010	0,7164
900	0,7287	0,7068	0,5957	0,7681	0,7008	0,7162
905	0,7278	0,7058	0,5997	0,7680	0,7019	0,7167
910	0,7274	0,7055	0,6049	0,7685	0,7020	0,7168
915	0,7266	0,7052	0,6103	0,7675	0,7015	0,7168
920	0,7267	0,7044	0,6152	0,7680	0,7019	0,7173
925	0,7267	0,7046	0,6185	0,7682	0,7023	0,7176
930	0,7269	0,7044	0,6217	0,7683	0,7022	0,7175
935	0,7295	0,7065	0,6234	0,7713	0,7042	0,7198
940	0,7284	0,7038	0,6273	0,7696	0,7011	0,7180
945	0,7287	0,7031	0,6320	0,7692	0,6982	0,7192
950	0,7282	0,7031	0,6365	0,7683	0,6960	0,7182
955	0,7268	0,7027	0,6402	0,7700	0,6925	0,7165
960	0,7277	0,7022	0,6435	0,7701	0,6900	0,7154
965	0,7274	0,7021	0,6444	0,7702	0,6858	0,7154
970	0,7271	0,7015	0,6460	0,7696	0,6892	0,7154
975	0,7272	0,7002	0,6476	0,7697	0,6919	0,7168
980	0,7268	0,7000	0,6505	0,7697	0,6924	0,7181
985	0,7275	0,6999	0,6543	0,7691	0,6934	0,7183
990	0,7269	0,6989	0,6580	0,7693	0,6946	0,7184
995	0,7265	0,6981	0,6607	0,7696	0,6953	0,7191
1000	0,7259	0,6972	0,6623	0,7691	0,6961	0,7196
1005	0,7249	0,6958	0,6628	0,7694	0,6973	0,7204
1010	0,7245	0,6953	0,6631	0,7695	0,6992	0,7197
1015	0,7247	0,6943	0,6626	0,7689	0,6997	0,7200
1020	0,7231	0,6934	0,6648	0,7680	0,6996	0,7197
1025	0,7223	0,6927	0,6684	0,7672	0,7009	0,7198

1030	0,7222	0,6920	0,6710	0,7687	0,7022	0,7202
1035	0,7213	0,6916	0,6737	0,7681	0,7036	0,7214
1040	0,7211	0,6914	0,6747	0,7685	0,7053	0,7208
1045	0,7210	0,6906	0,6750	0,7692	0,7054	0,7203
1050	0,7204	0,6896	0,6755	0,7697	0,7068	0,7216
1055	0,7198	0,6890	0,6736	0,7686	0,7069	0,7212
1060	0,7193	0,6881	0,6742	0,7691	0,7073	0,7221
1065	0,7192	0,6871	0,6756	0,7692	0,7070	0,7214
1070	0,7186	0,6871	0,6785	0,7707	0,7066	0,7220
1075	0,7186	0,6868	0,6826	0,7703	0,7077	0,7214
1080	0,7185	0,6861	0,6831	0,7707	0,7077	0,7208
1085	0,7164	0,6875	0,6831	0,7704	0,7096	0,7213
1090	0,7170	0,6835	0,6857	0,7714	0,7083	0,7228
1095	0,7163	0,6841	0,6844	0,7711	0,7064	0,7226
1100	0,7161	0,6825	0,6849	0,7693	0,7085	0,7244

Tabla 4.1.1 Ensayo Reflectividad Espectral
--

Anexo B

A continuación se mostrará gráficamente en el eje izquierdo una comparativa entre la radiación que proviene del sol (rojo) y la reflejada por cada material (verde). En el eje derecho se muestra la reflectividad (azul) en función de la longitud de onda (μm). Tenemos dos gráficas para cada material porque la primera representa las magnitudes para cada longitud de onda y la segunda la integral bajo cada curva.

• Pintura Acrílica:

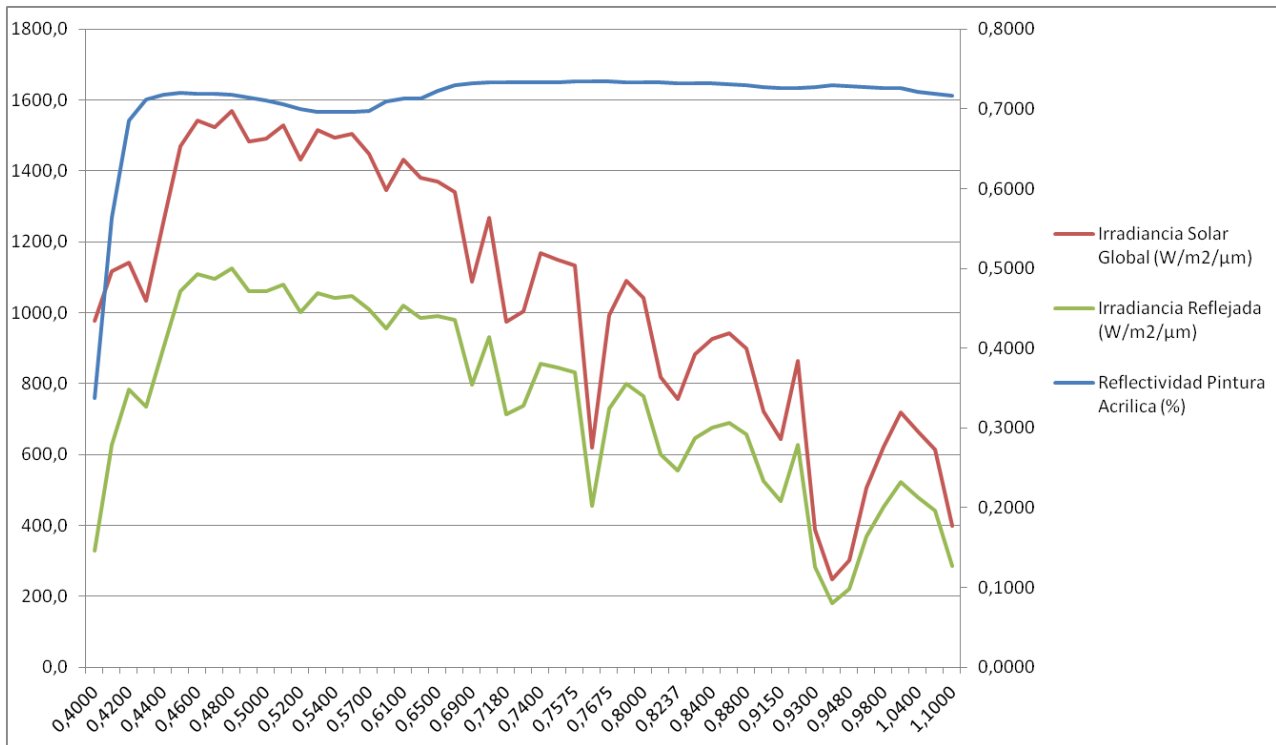


Figura B.1 Pintura Acrílica Irradiancia Reflejada [33]

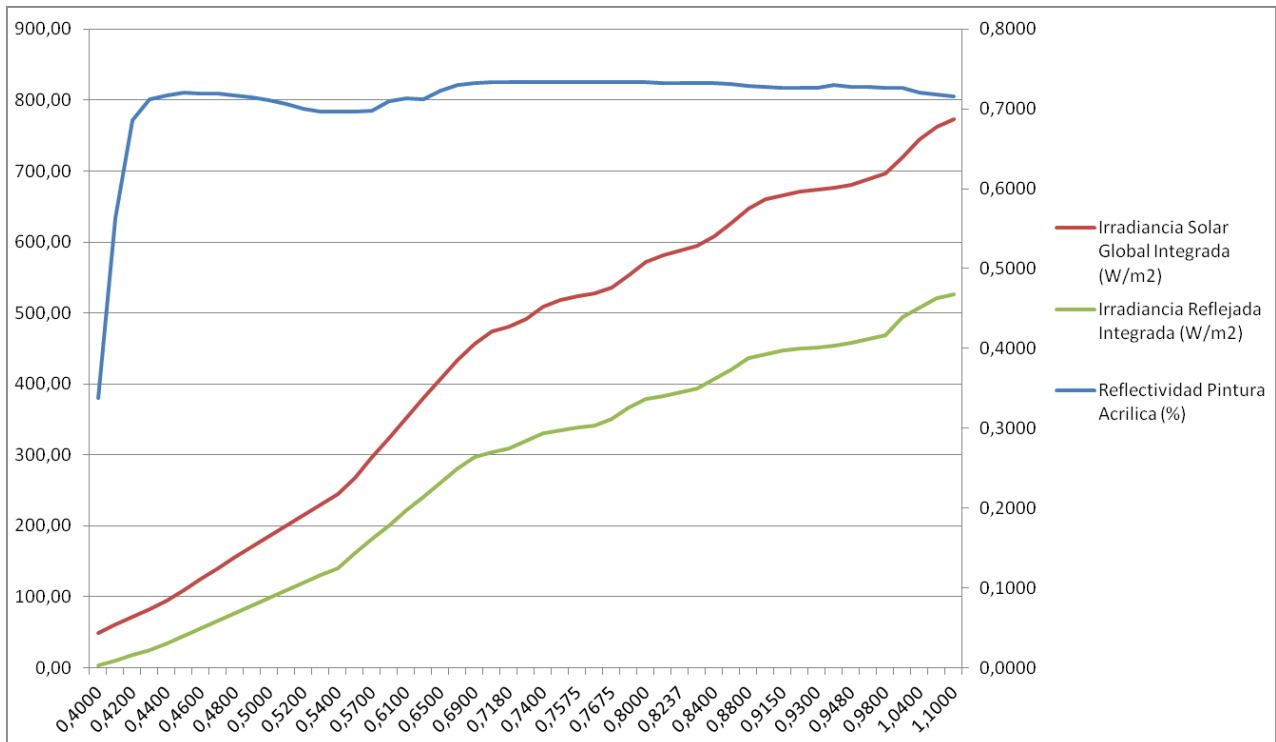


Figura B.2 Pintura Acrílica Irradiancia Reflejada Integrada [33]

- Aluminio Lacado:



Figura B.3 Aluminio Lacado Irradiancia Reflejada [33]

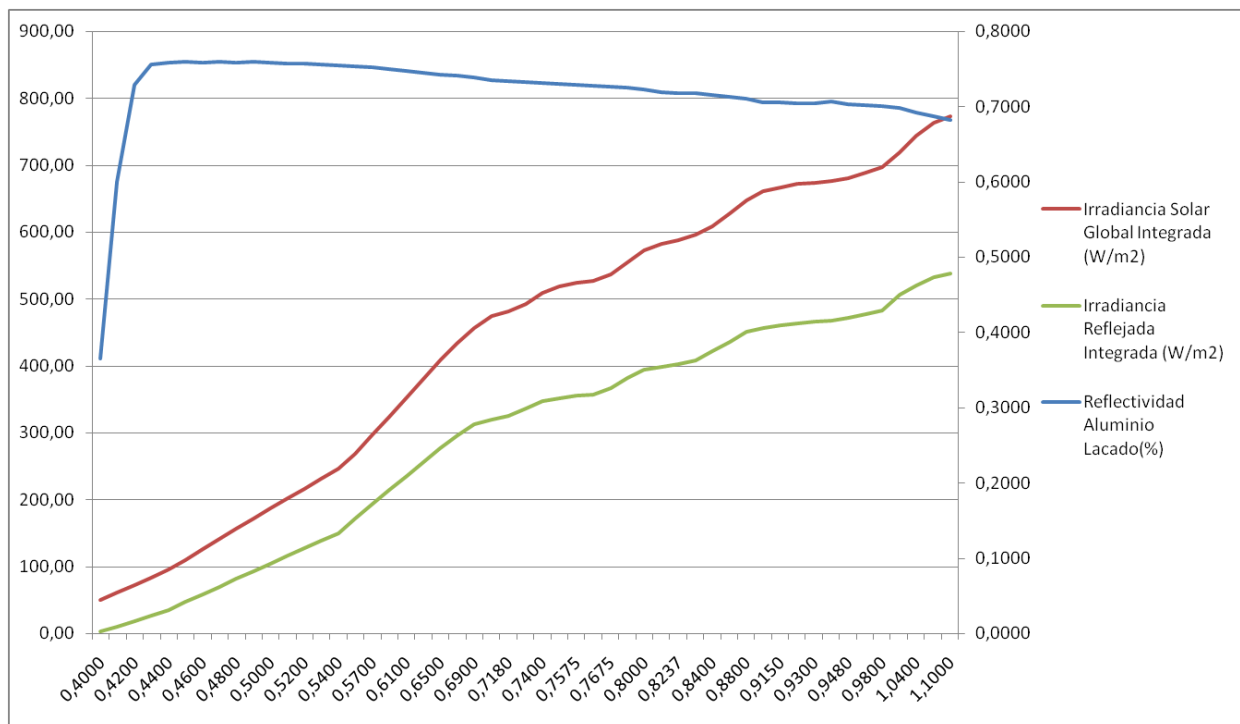


Figura B.4 Aluminio Lacado Irradiancia Reflejada Integrada [33]

• Aluminio Anodizado:

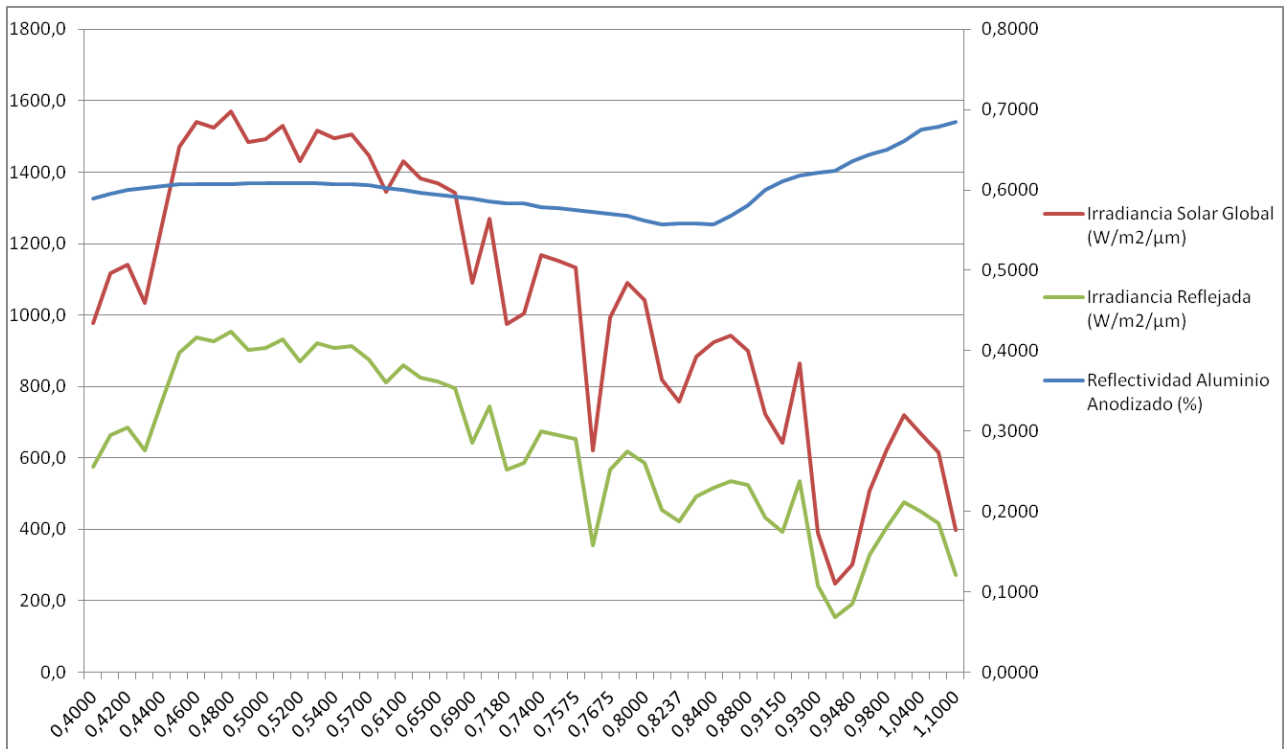


Figura B.5 Aluminio Anodizado Irradiancia Reflejada [33]

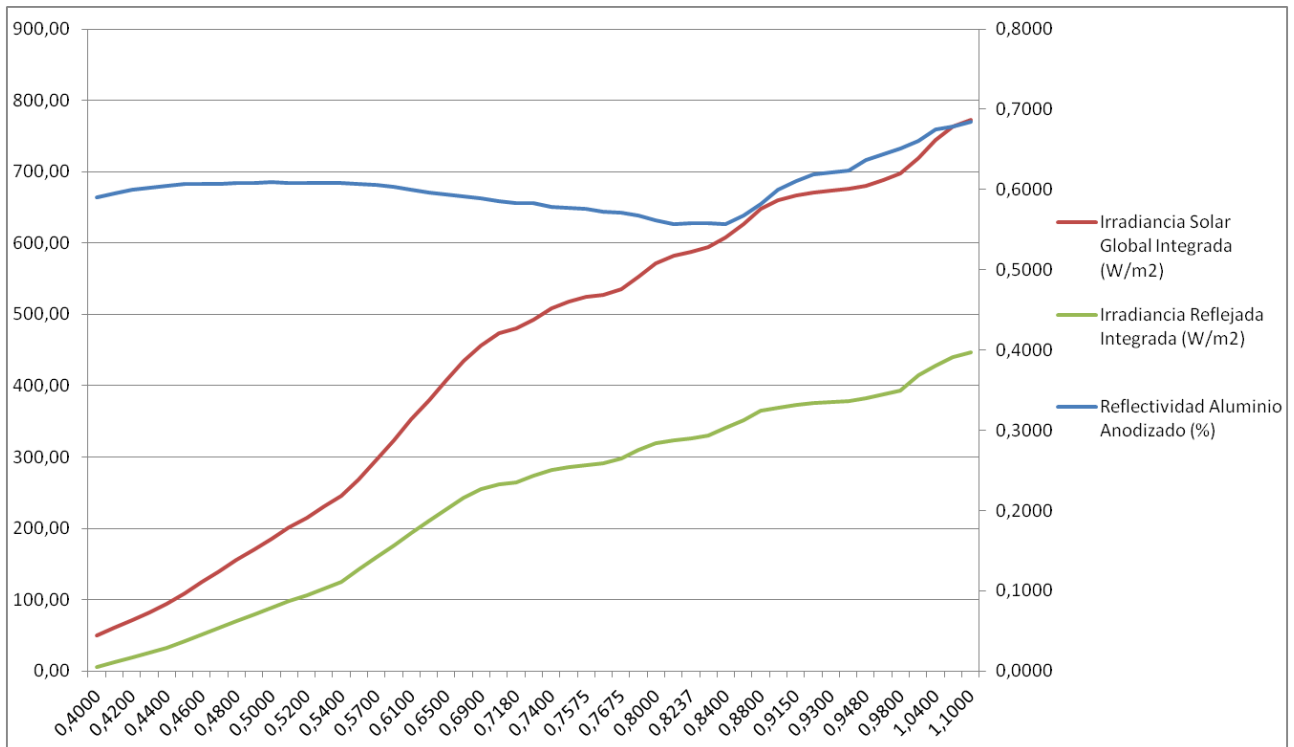


Figura B.6 Aluminio Anodizado Irradiancia Reflejada Integrada [33]

- Pintura de Dióxido de Titanio:

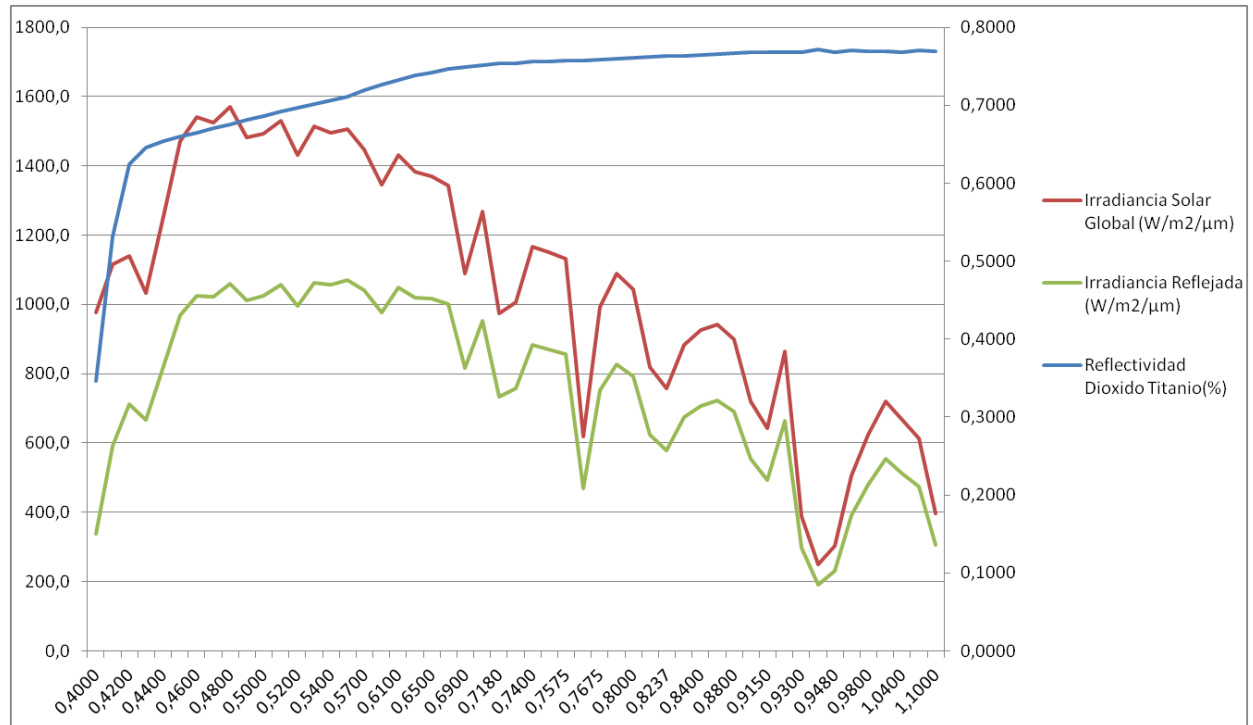


Figura B.7 Pintura Dióxido Titanio Irradiancia Reflejada [33]

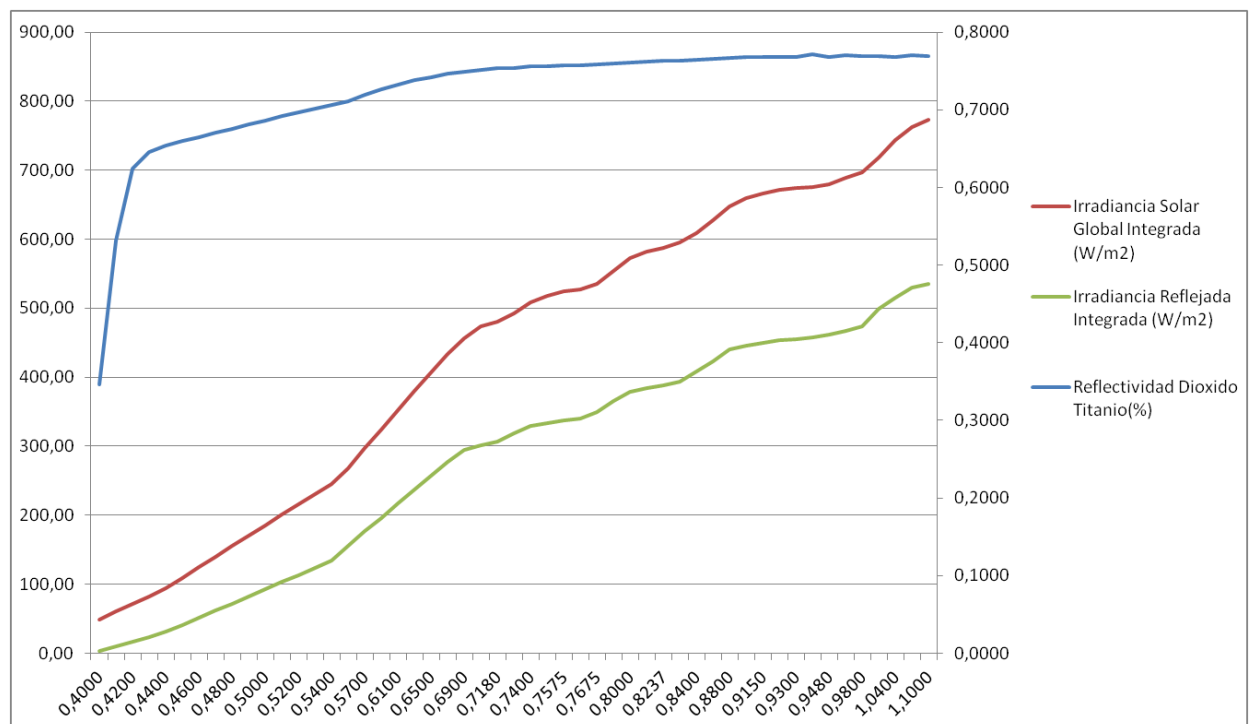


Figura B.8 Pintura Dióxido Titanio Irradiancia Reflejada Integrada [33]

• Cemento Blanco con Arena:



Figura B.9 Cemento Blanco Arena Irradiancia Reflejada [33]

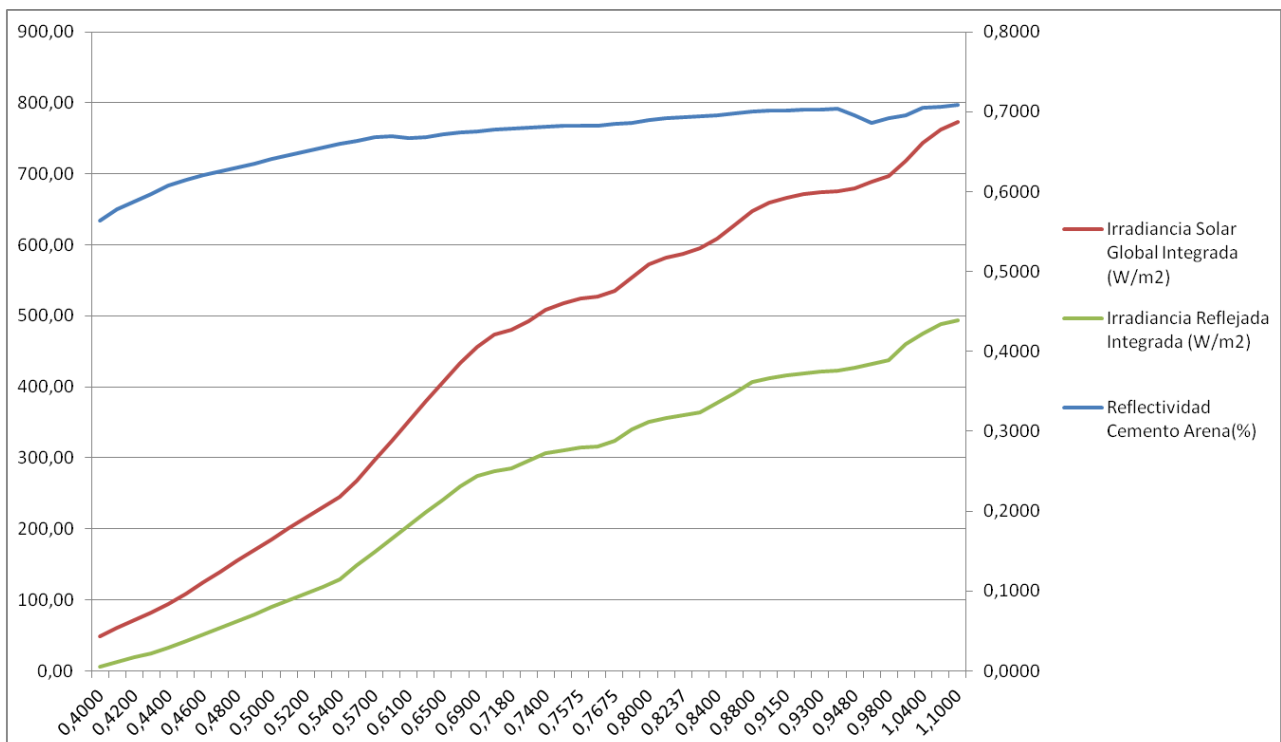


Figura B.10 Cemento Blanco Arena Irradiancia Reflejada Integrada [33]

- Cemento Blanco Puro:



Figura B.11 Cemento Blanco Puro Irradiancia Reflejada [33]

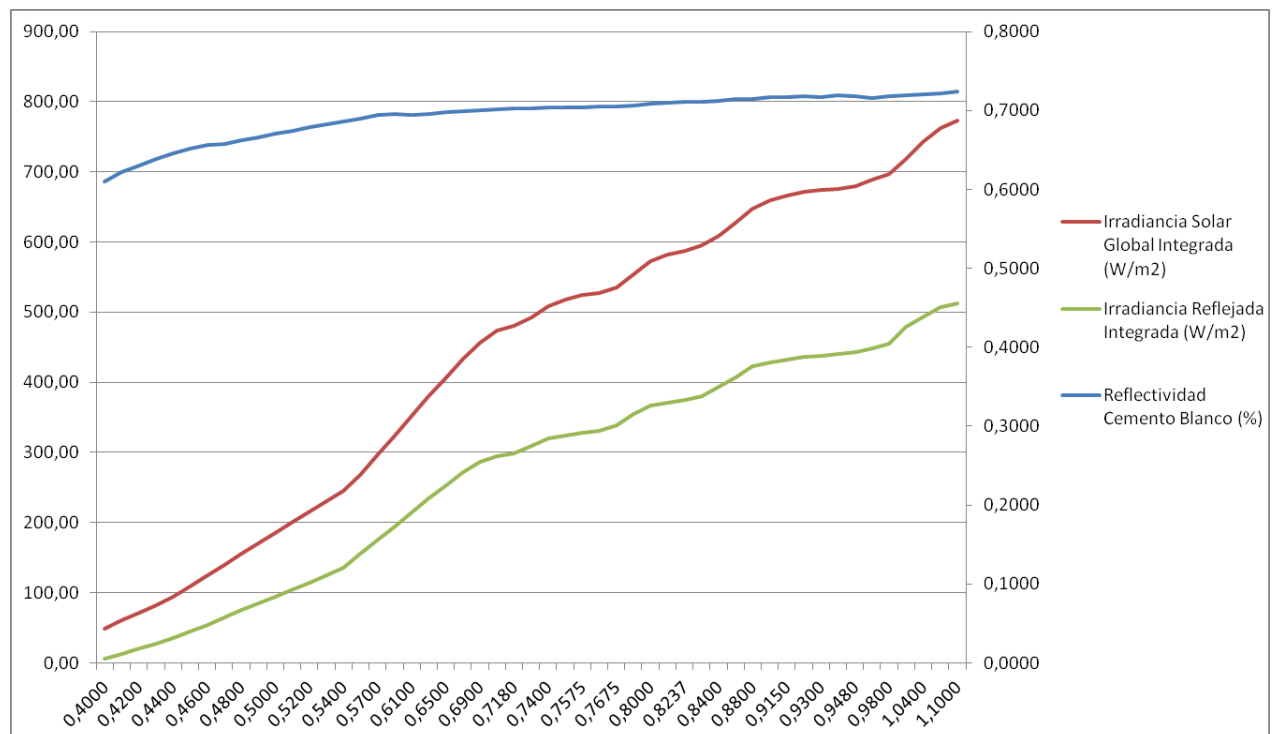


Figura B.12 Cemento Blanco Puro Irradiancia Reflejada Integrada [33]

Anexo C

Gráficamente, se mostrará en primer lugar la comparativa entre el espectro de la radiación solar, esta radiación integrada y la respuesta espectral de cada tecnología fotovoltaica.

En segundo lugar, se mostrarán los resultados de las comparativas entre la radiación solar (rojo), la reflejada por cada material (verde), su reflectividad (azul) y la irradiancia que es convertida en corriente por el panel (morado) en función de la longitud de onda (μm). De la misma manera que antes, tenemos dos gráficas para cada material porque la primera representa las magnitudes para cada longitud de onda y la segunda la integral bajo cada curva.

Es importante recordar que la radiación solar y la reflejada ($\frac{W}{m^2}$) tienen unidades distintas que la radiación que finalmente es convertida en corriente por la célula ($\frac{A}{m^2}$) y, por lo tanto, no se pueden comparar entre sí. Sin embargo, sí nos permite comparar los materiales entre sí, que es el objetivo de este estudio.

Silicio Monocristalino

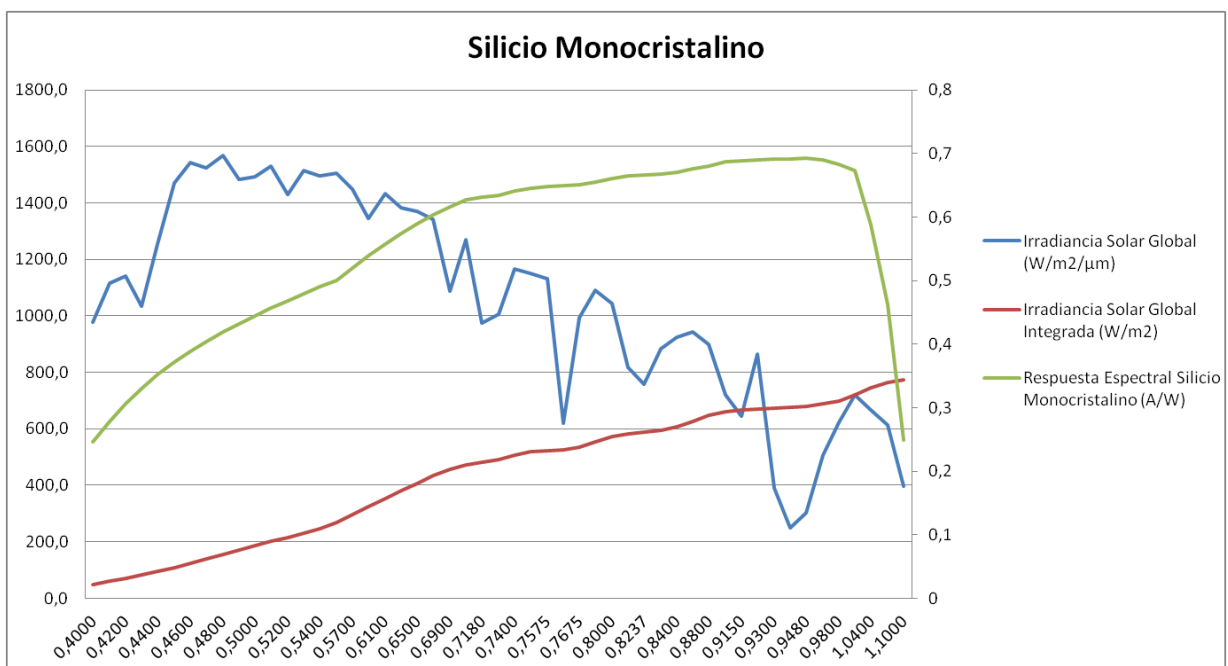


Figura C.1 Silicio Monocristalino [33]

- Pintura Acrílica:

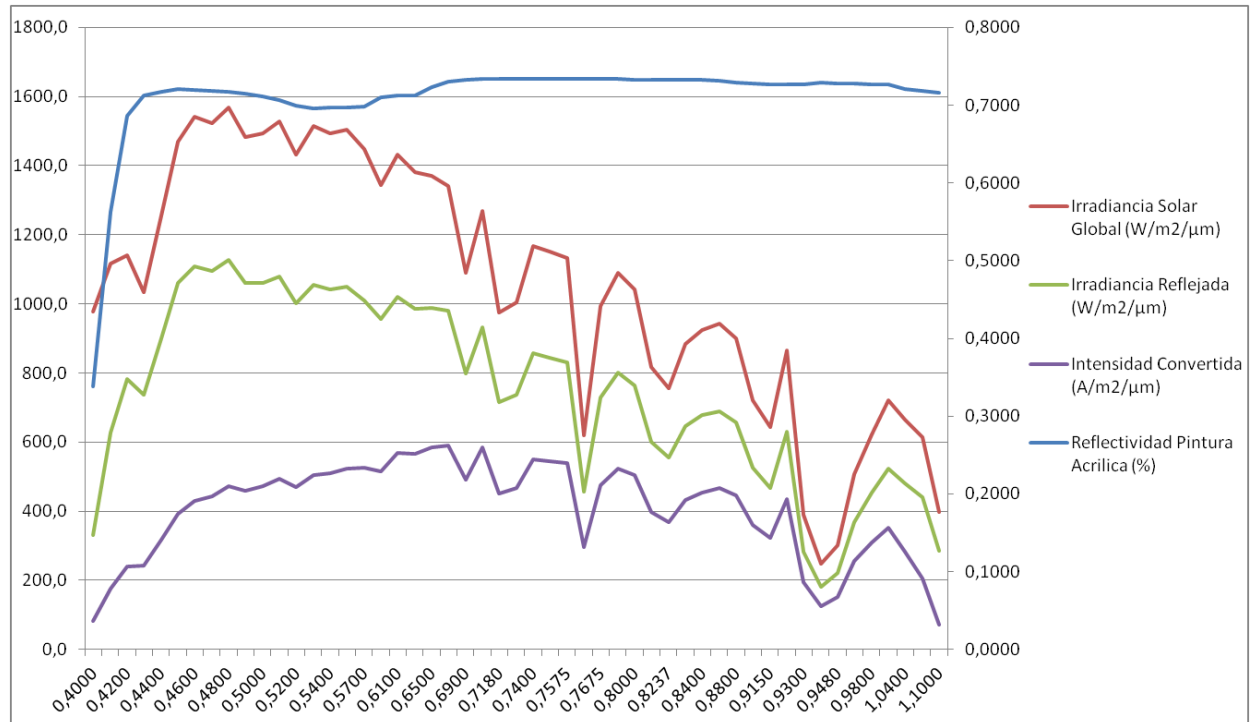


Figura C.2 Silicio Monocristalino-Pintura Acrílica-Intensidad Convertida [33]

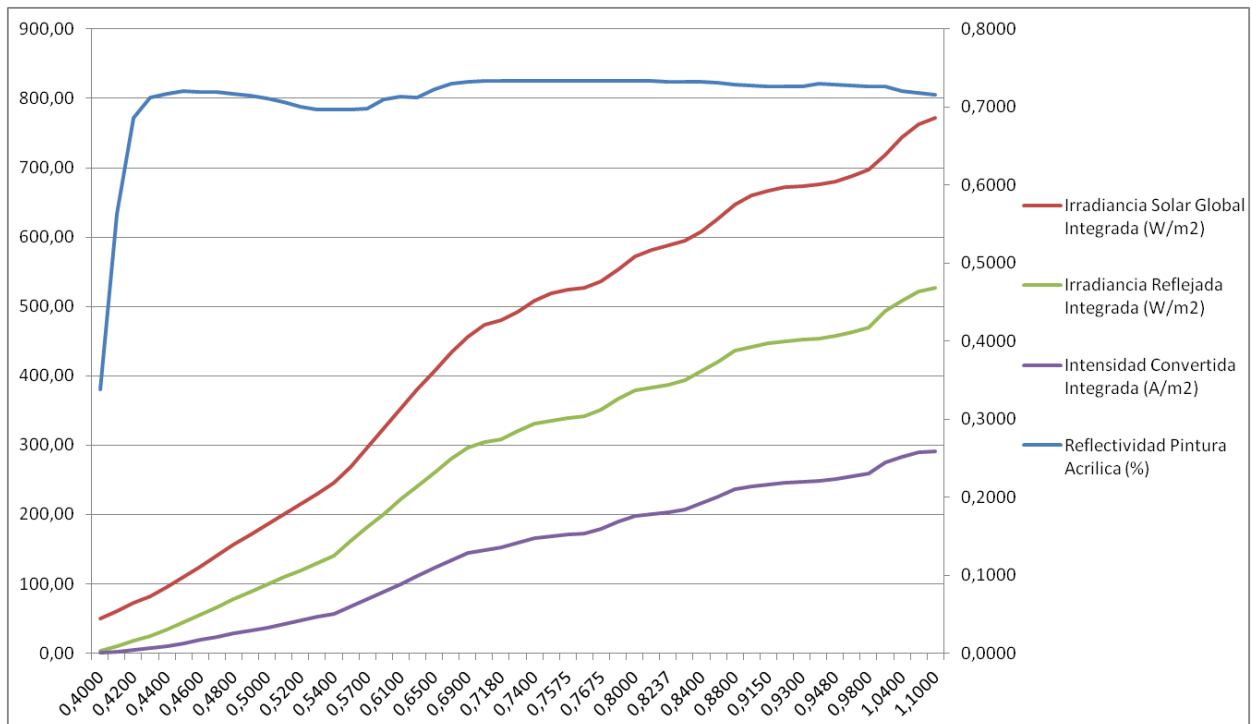


Figura C.3 Silicio Monocristalino-Pintura Acrílica-Intensidad Convertida Integrada [33]

• Aluminio Lacado:

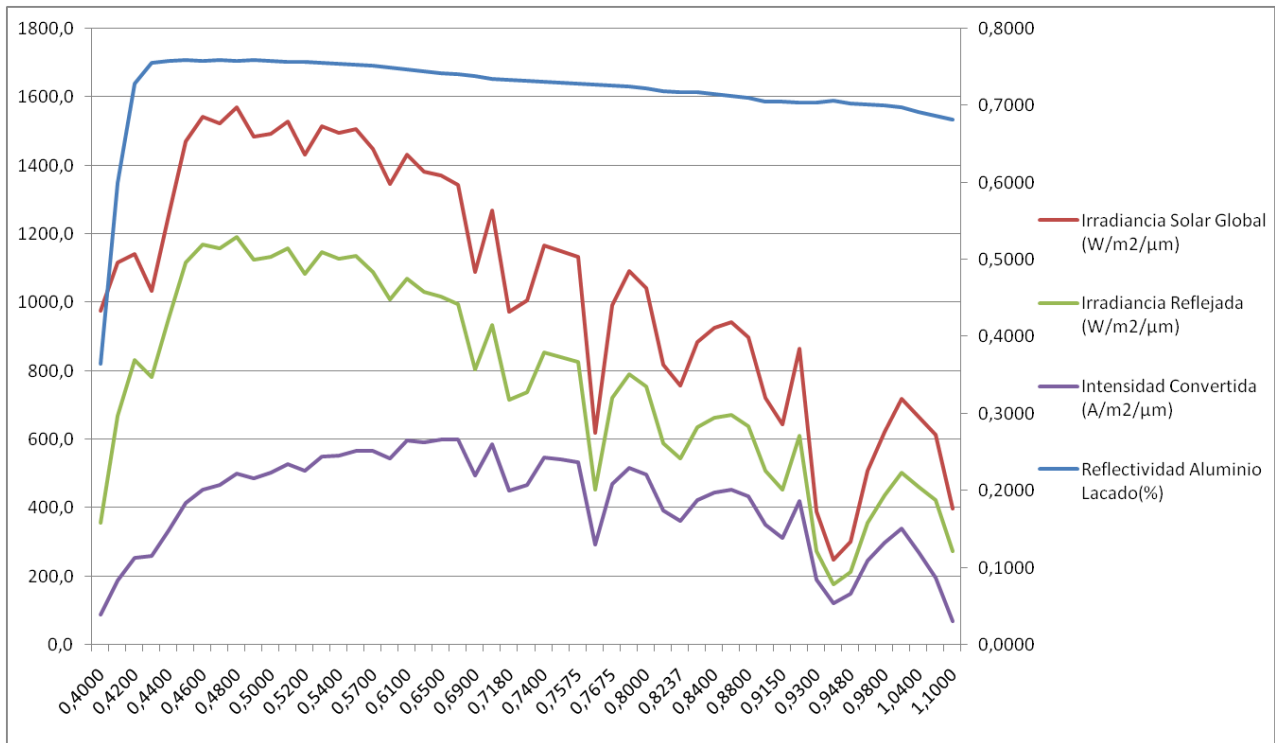


Figura C.4 Silicio Monocristalino-Aluminio Lacado-Intensidad Convertida [33]

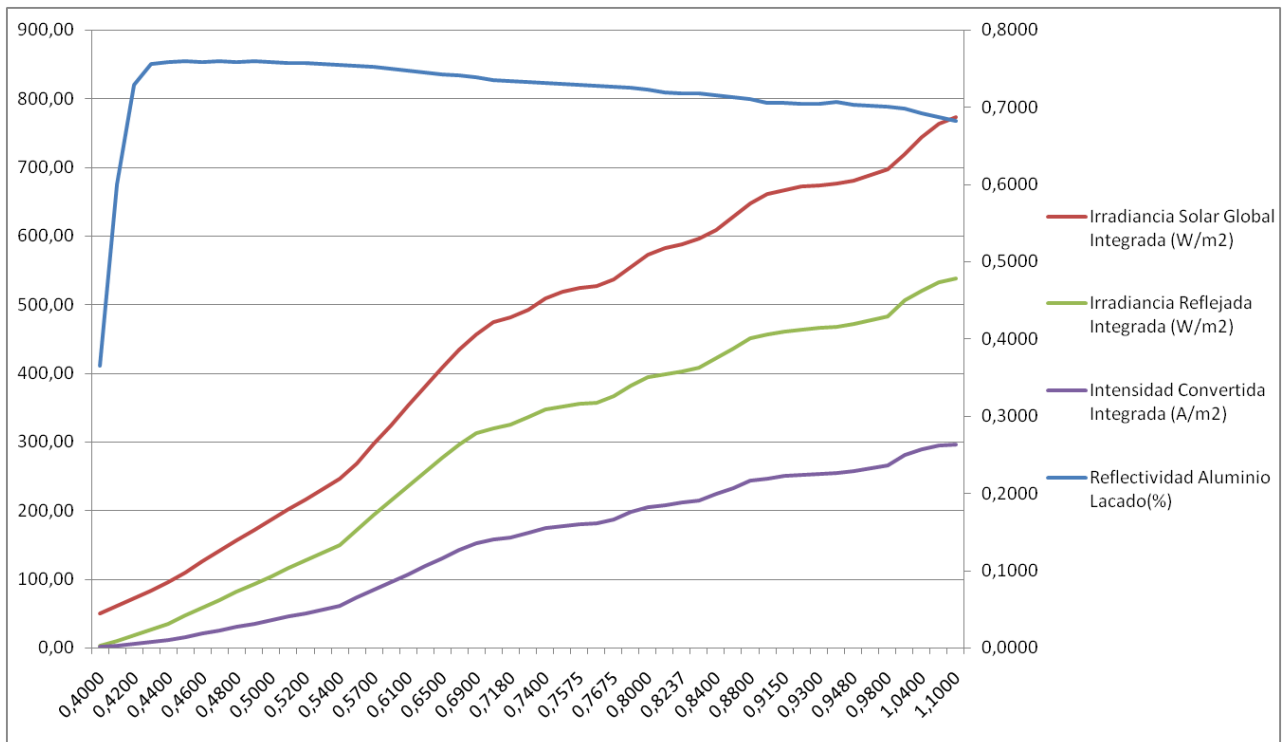


Figura C.5 Silicio Monocristalino-Aluminio Lacado-Intensidad Convertida Integrada [33]

• Aluminio Anodizado:

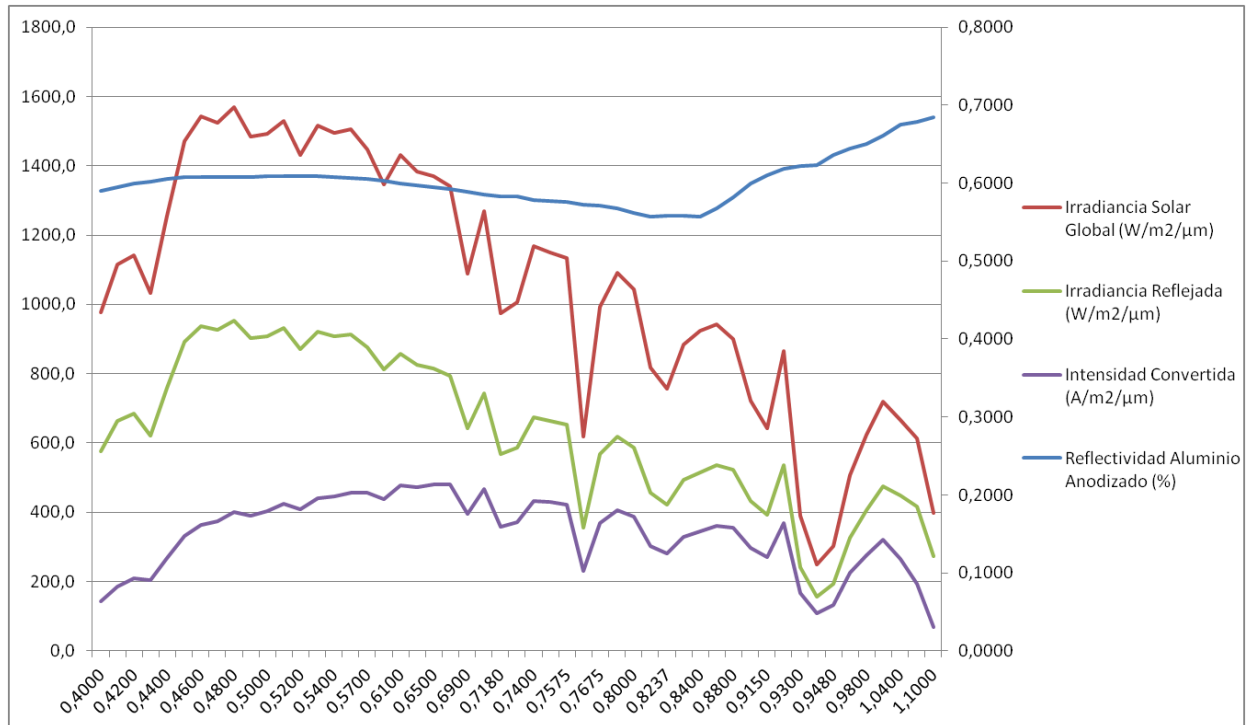


Figura C.6 Silicio Monocristalino-Aluminio Anodizado-Intensidad Convertida [33]

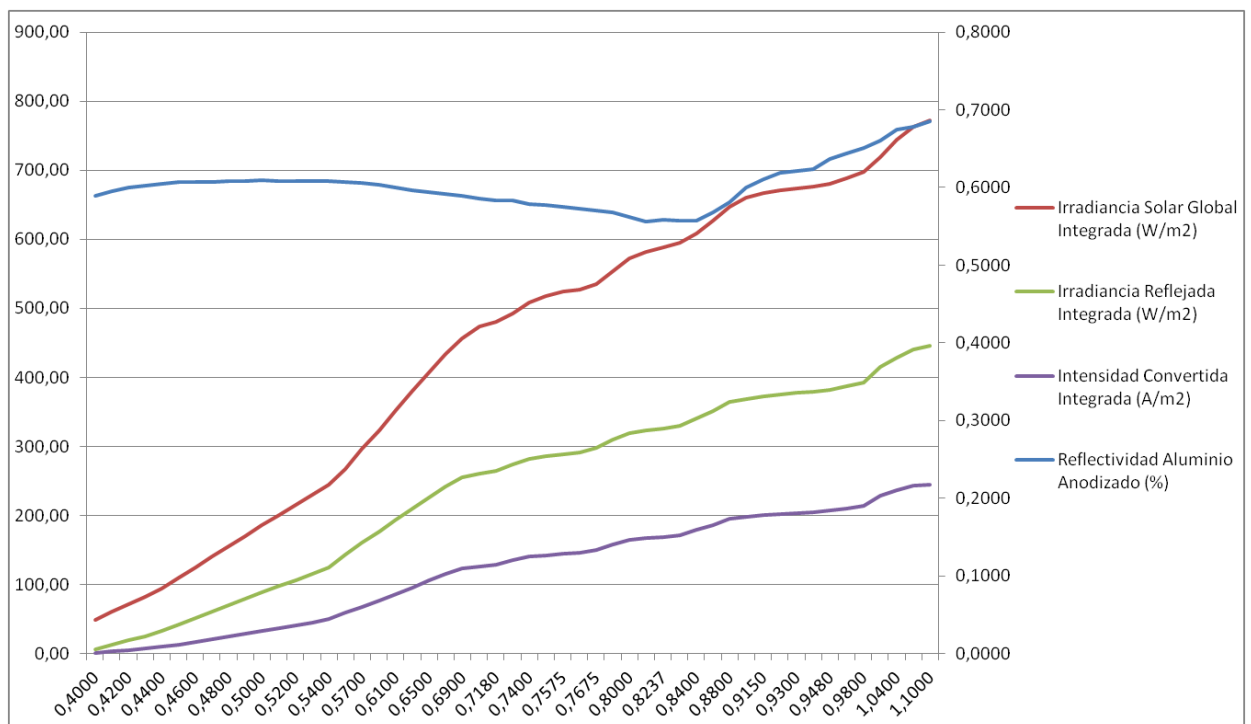


Figura C.7 Silicio Monocristalino-Aluminio Anodizado-Intensidad Convertida Integrada [33]

• Pintura de Dióxido de Titanio:

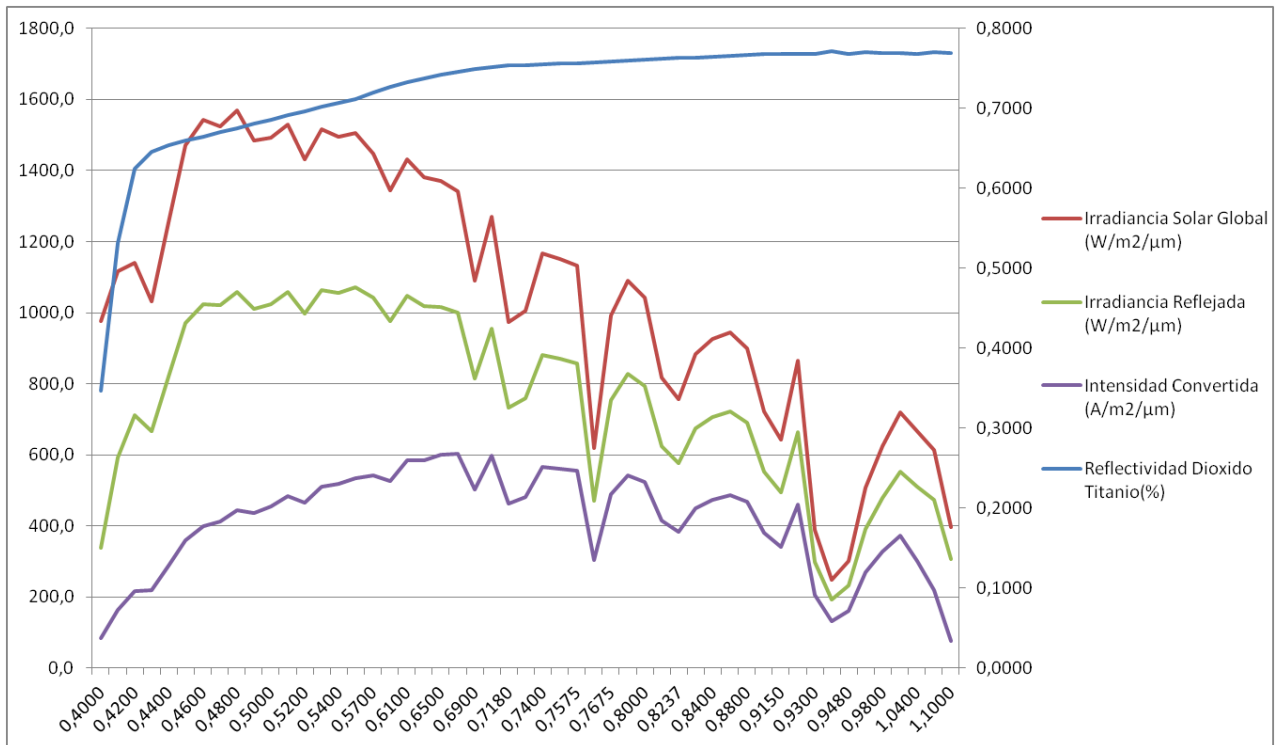


Figura C.8 Silicio Monocristalino-Pintura de Dióxido de Titanio -Intensidad Convertida [33]

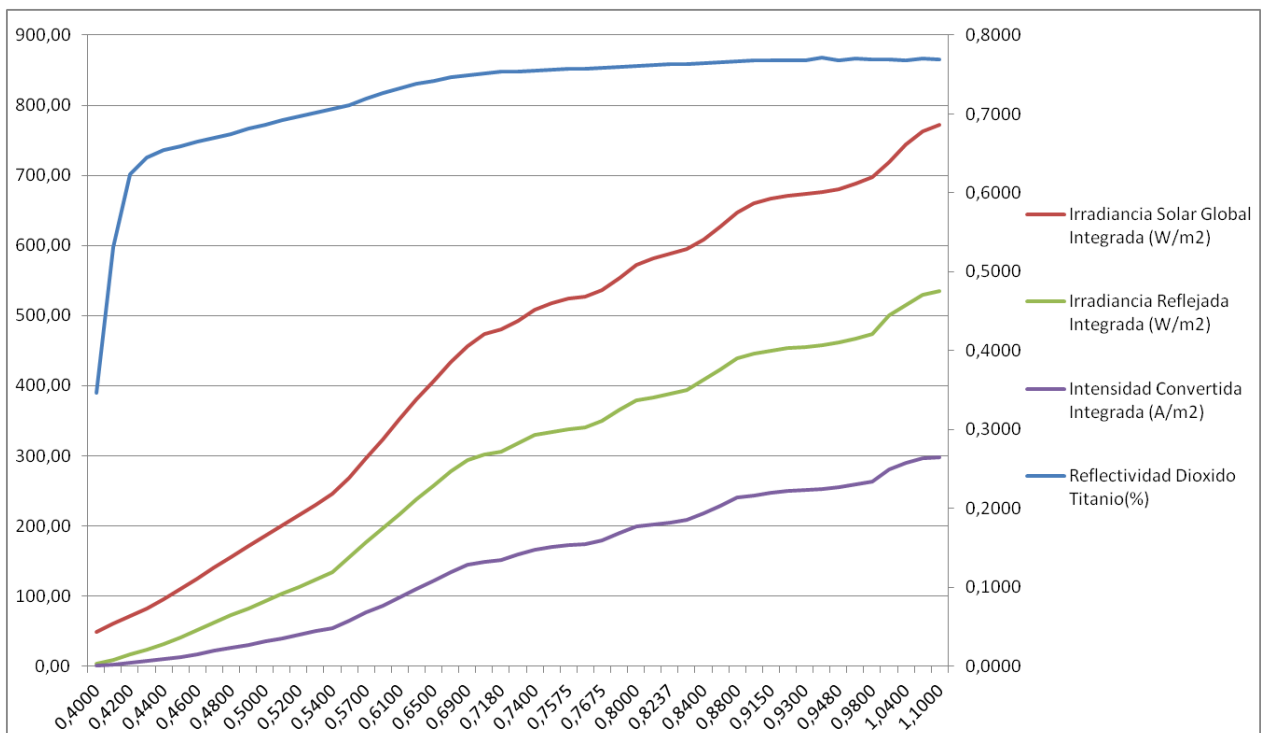


Figura C.9 Silicio Monocristalino-Pintura de Dióxido de Titanio -Intensidad Convertida Integrada [33]

• Cemento Blanco con Arena:

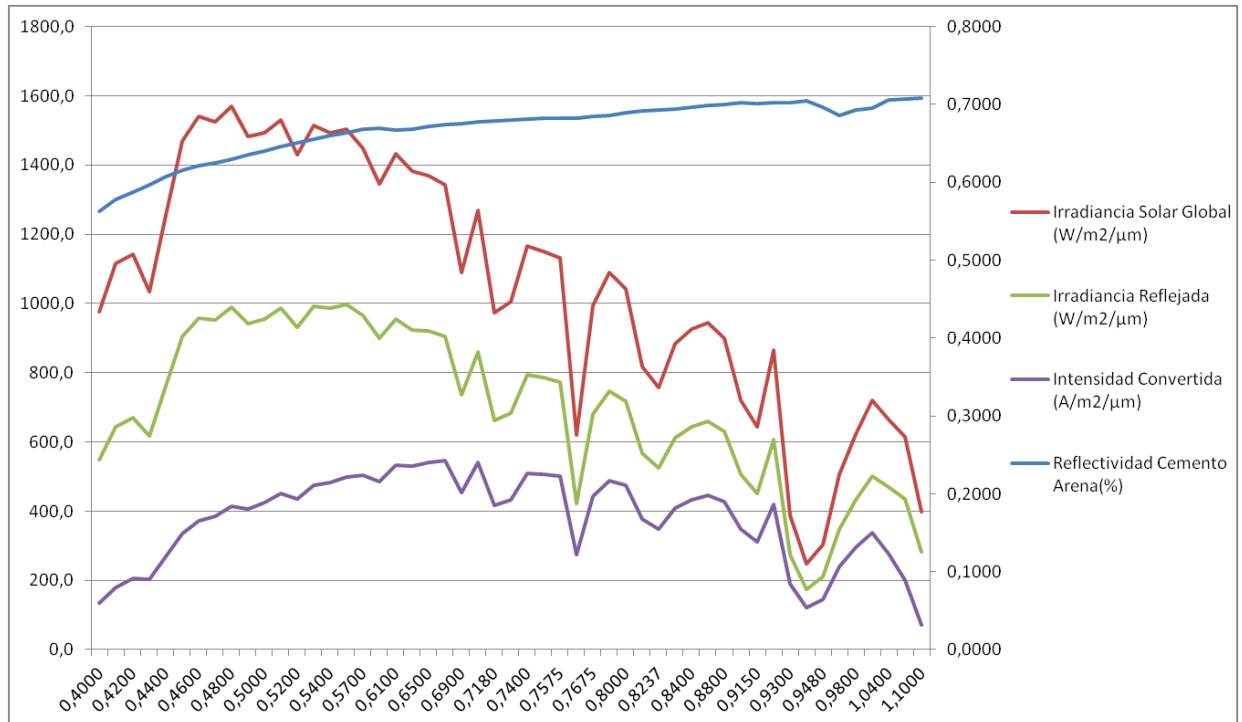


Figura C.10 Silicio Monocristalino-Cemento Blanco con Arena-Intensidad Convertida [33]

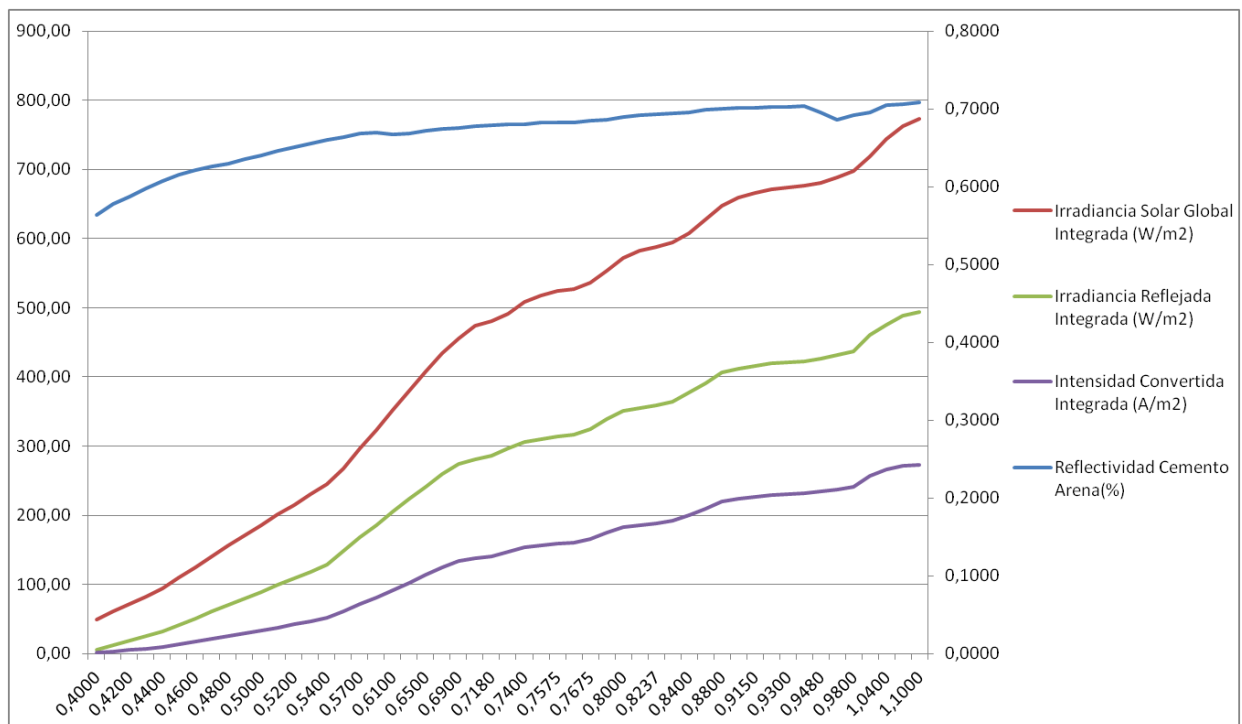


Figura C.11 Silicio Monocristalino-Cemento Blanco con Arena-Intensidad Convertida Integrada [33]

• Cemento Blanco Puro:



Figura C.12 Silicio Monocristalino-Cemento Blanco Puro-Intensidad Convertida [33]

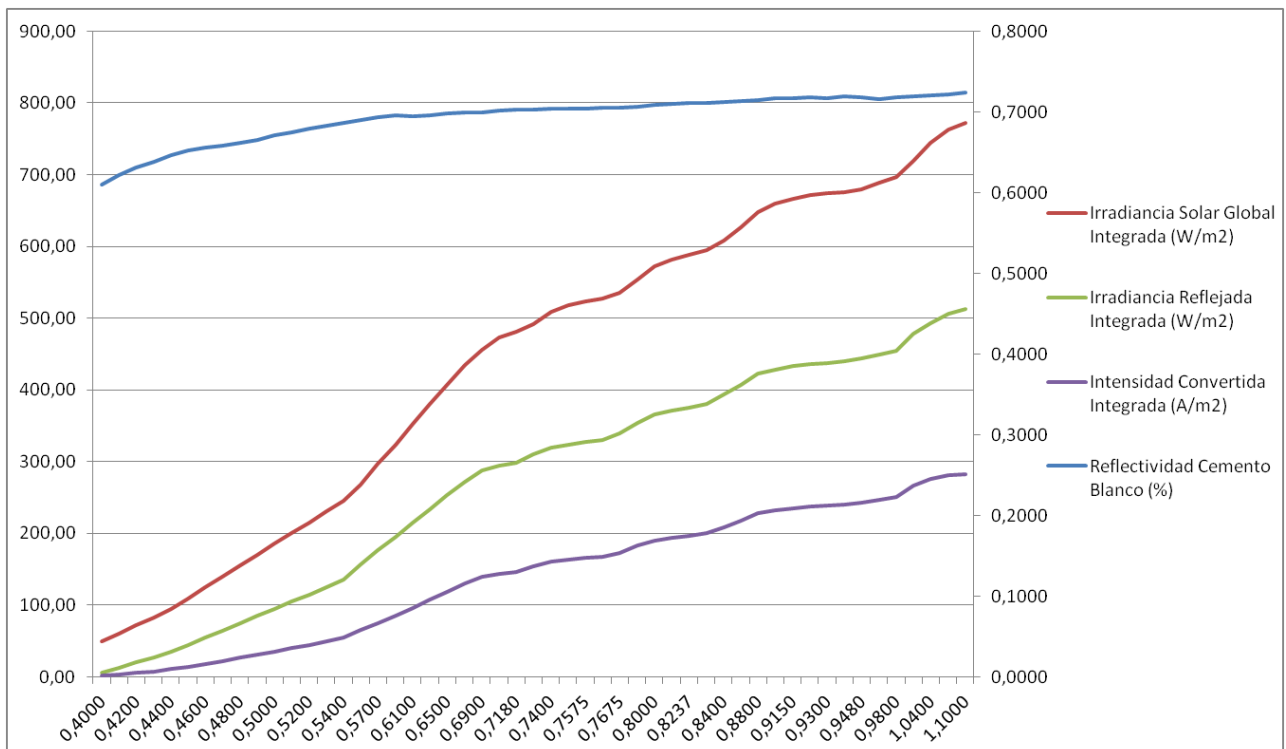


Figura C.13 Silicio Monocristalino-Cemento Blanco Puro-Intensidad Convertida Integrada [33]

Silicio Policristalino

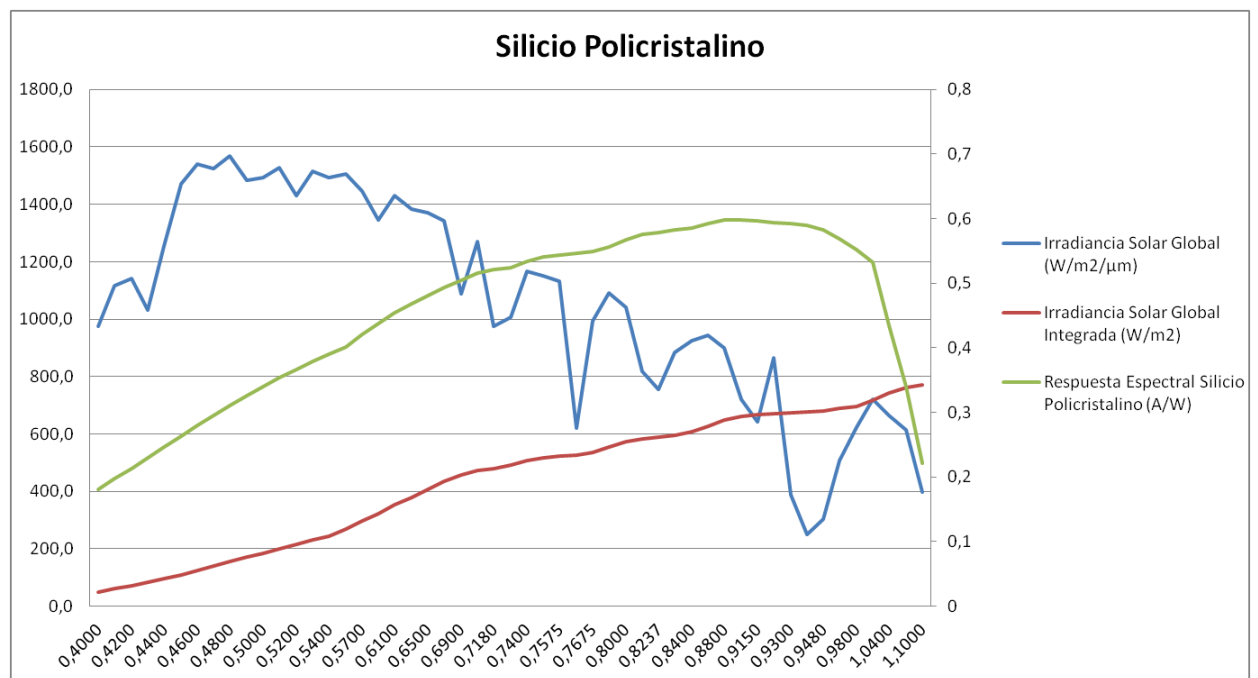


Figura C.14 Silicio Policristalino-Intensidad Convertida [33]

• Pintura Acrílica:

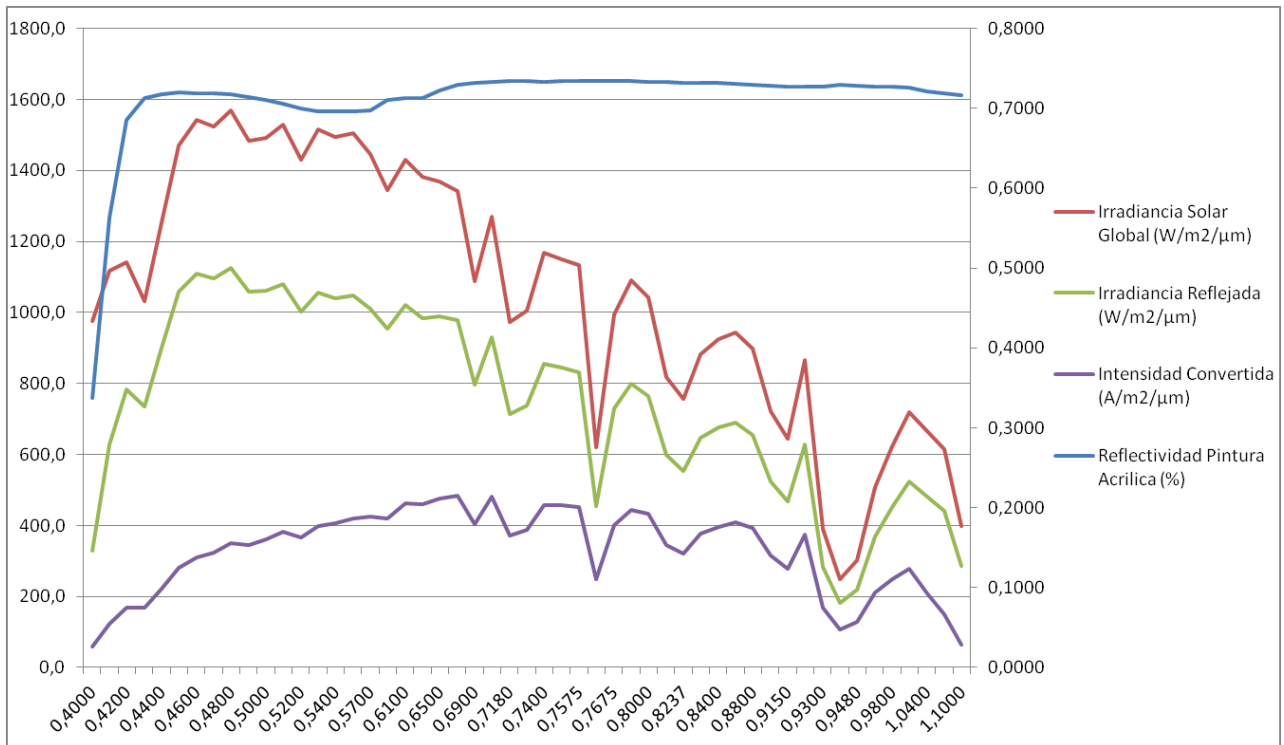


Figura C.15 Silicio Policristalino-Pintura Acrílica-Intensidad Convertida [33]

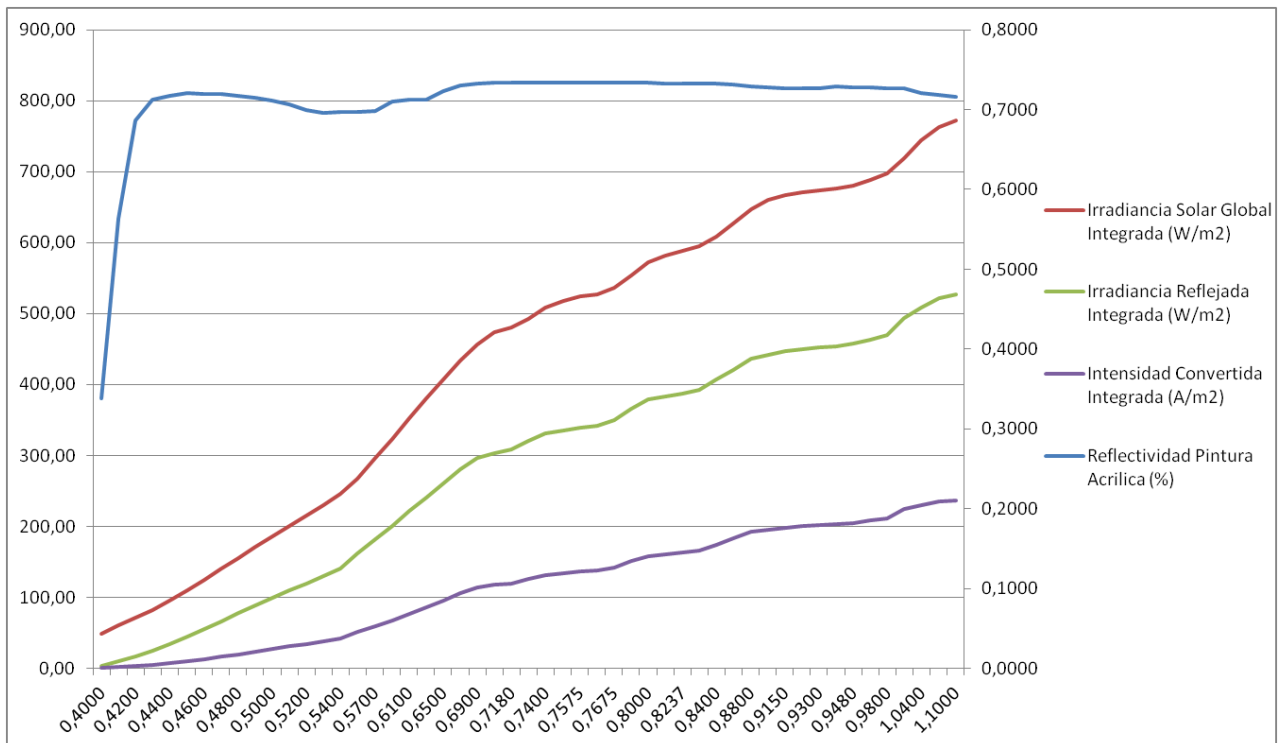


Figura C.16 Silicio Policristalino-Pintura Acrílica-Intensidad Convertida Integrada [33]

• Aluminio Lacado:

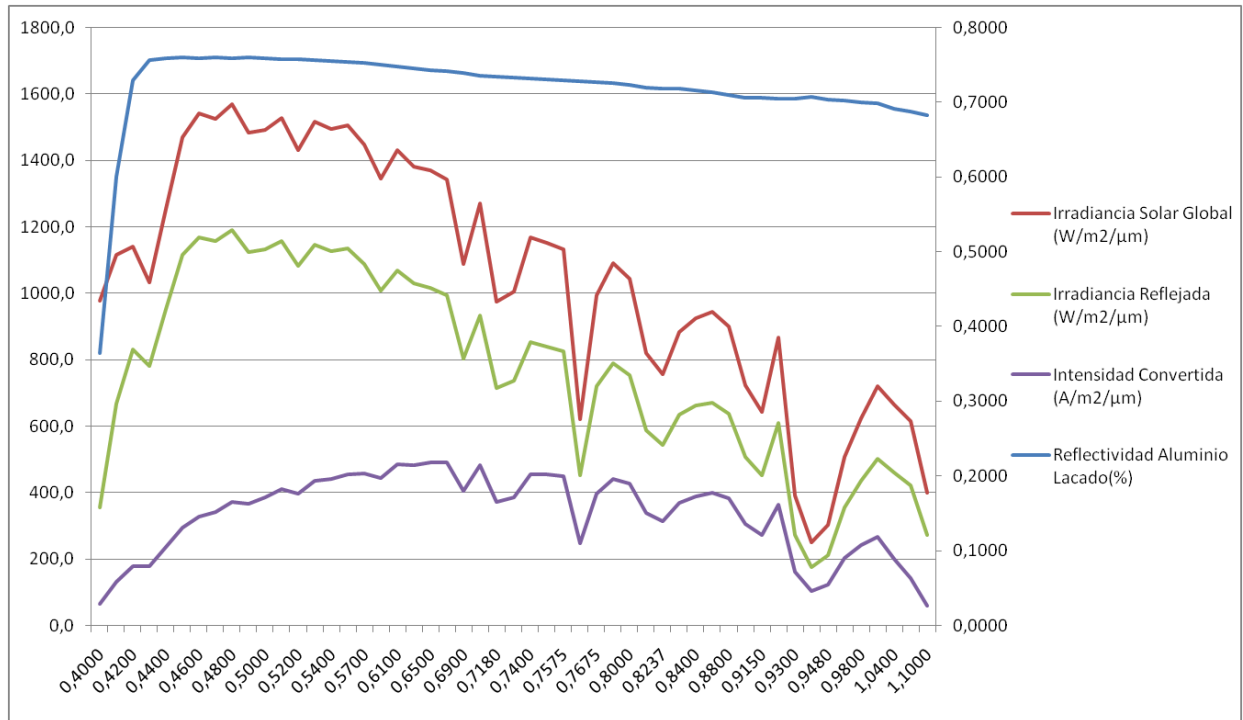


Figura C.17 Silicio Policristalino-Aluminio Lacado-Intensidad Convertida [33]

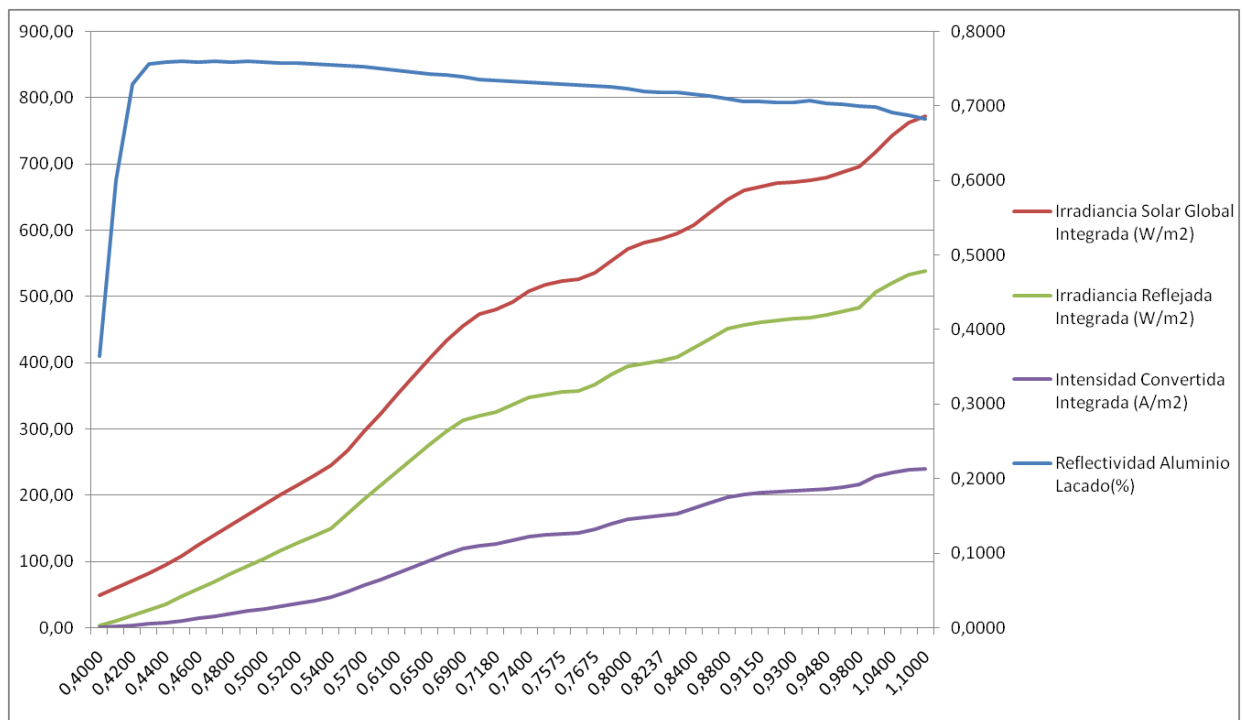


Figura C.18 Silicio Policristalino-Aluminio Lacado-Intensidad Convertida Integrada [33]

• Aluminio Anodizado:

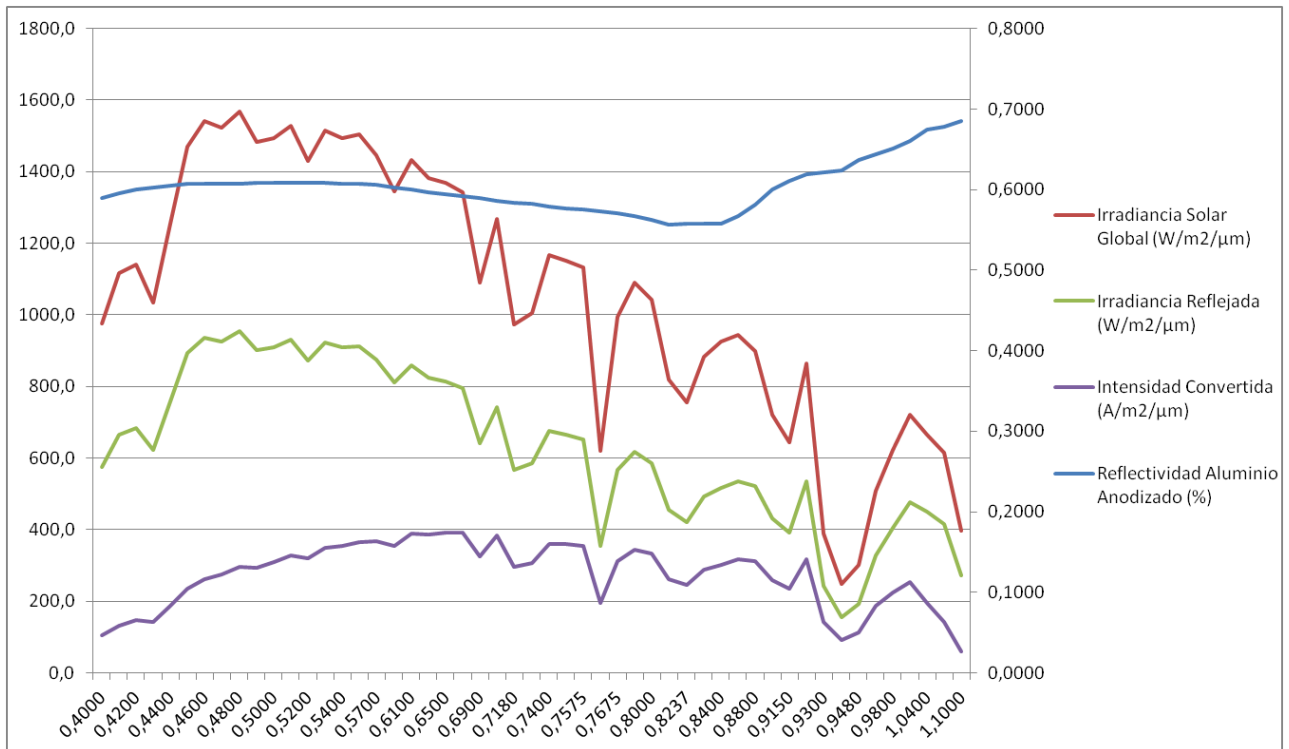


Figura C.19 Silicio Policristalino-Aluminio Anodizado-Intensidad Convertida [33]

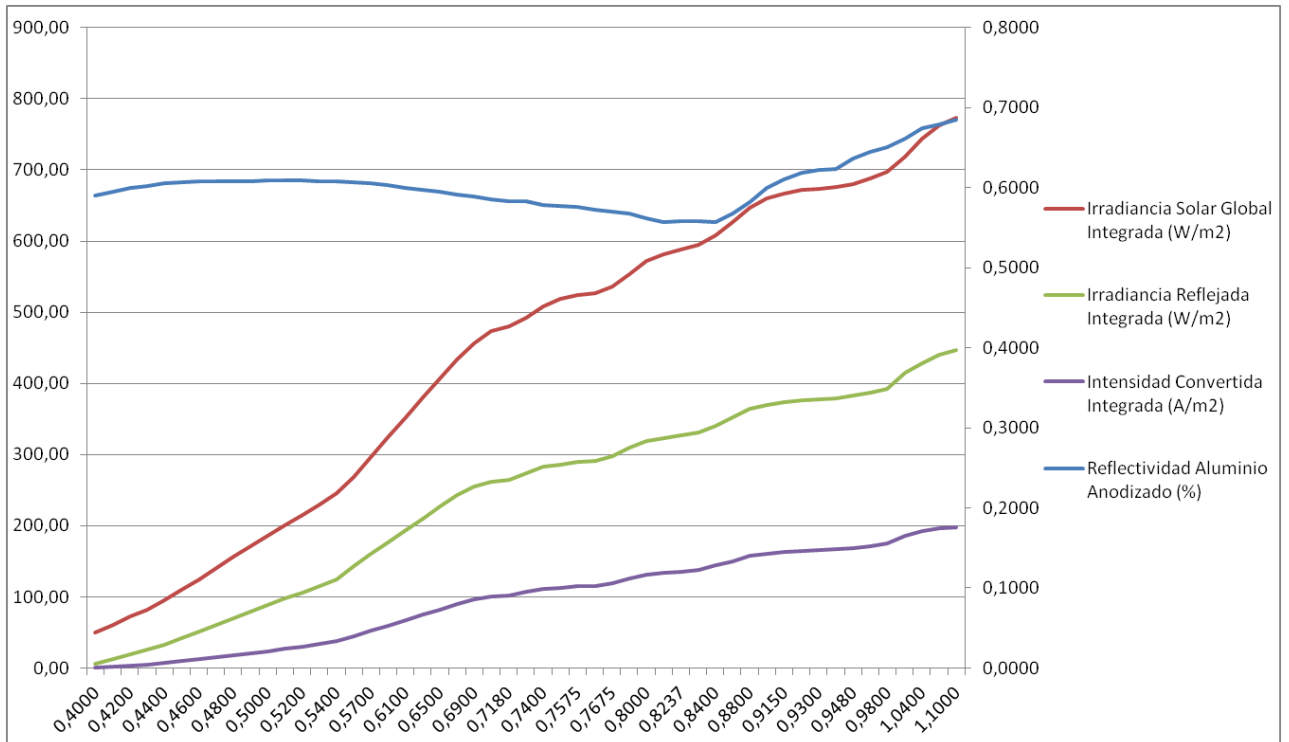


Figura C.20 Silicio Policristalino-Aluminio Anodizado-Intensidad Convertida Integrada [33]

- Pintura de Dióxido de Titanio:

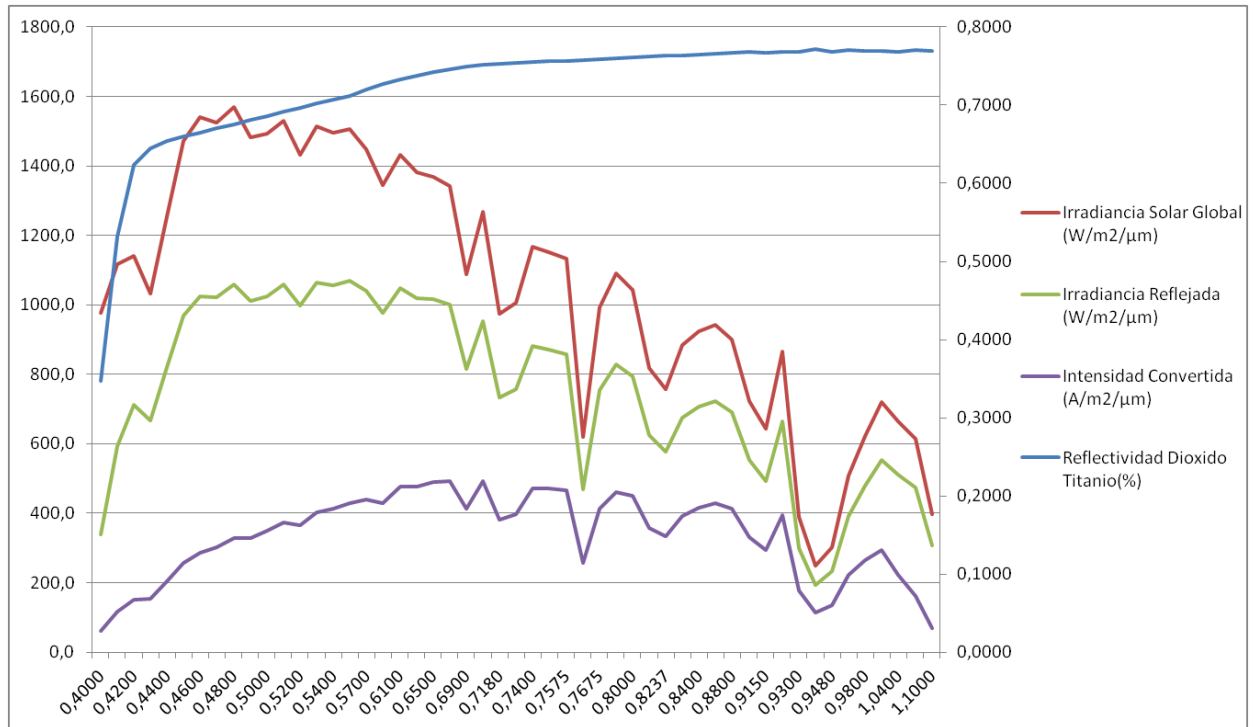


Figura C.21 Silicio Policristalino-Pintura de Dióxido de Titanio -Intensidad Convertida [33]

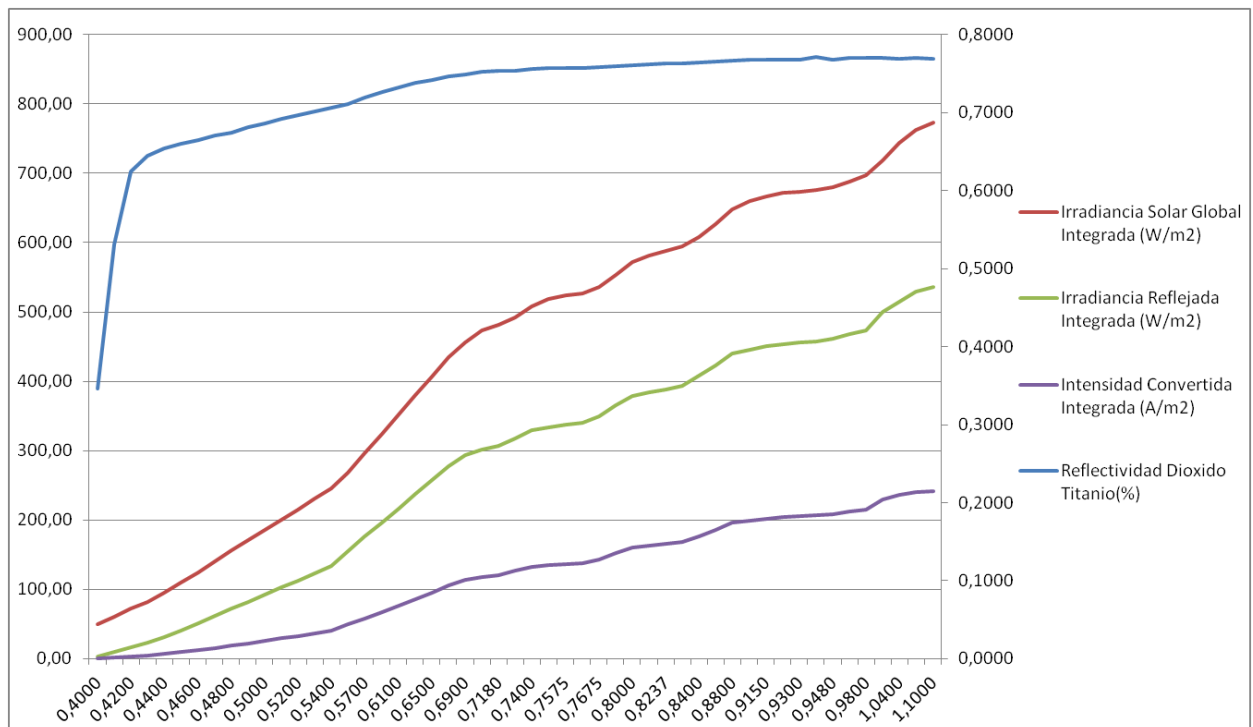


Figura C.22 Silicio Policristalino-Pintura de Dióxido de Titanio -Intensidad Convertida Integrada [33]

• Cemento Blanco con Arena:

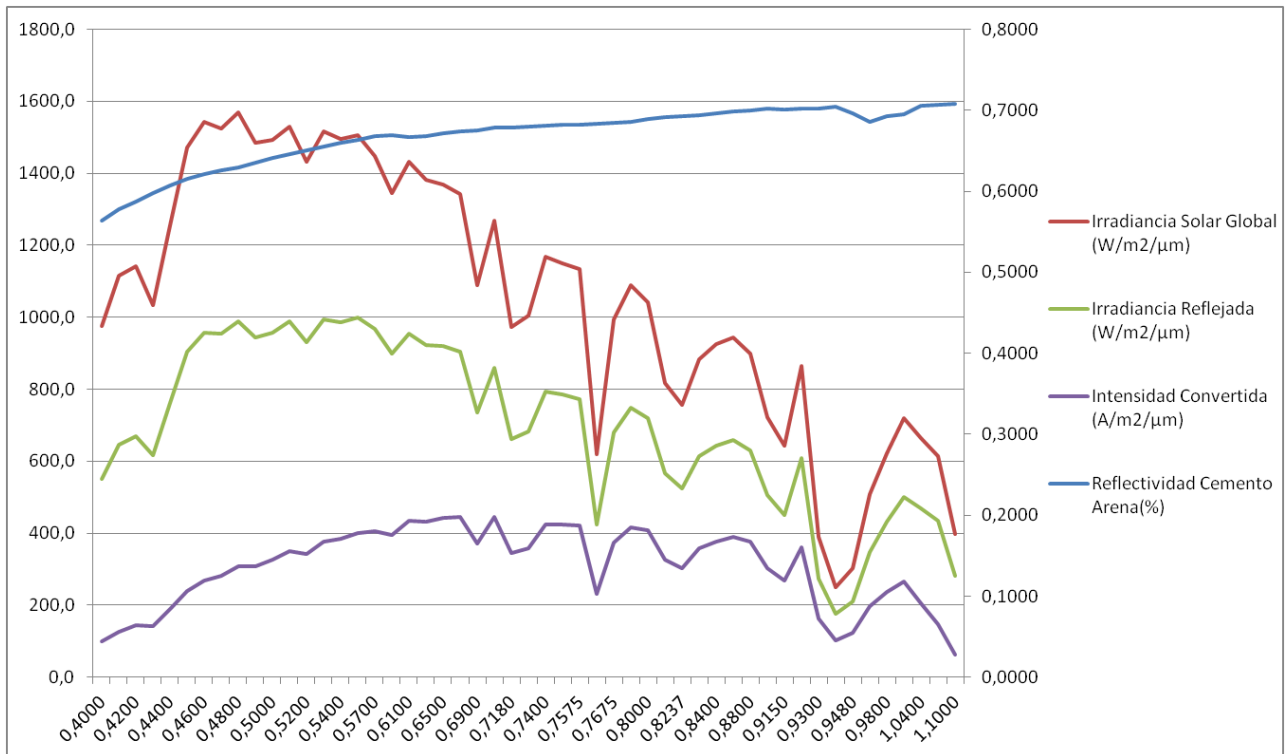


Figura C.23 Silicio Policristalino-Cemento Blanco con Arena-Intensidad Convertida [33]

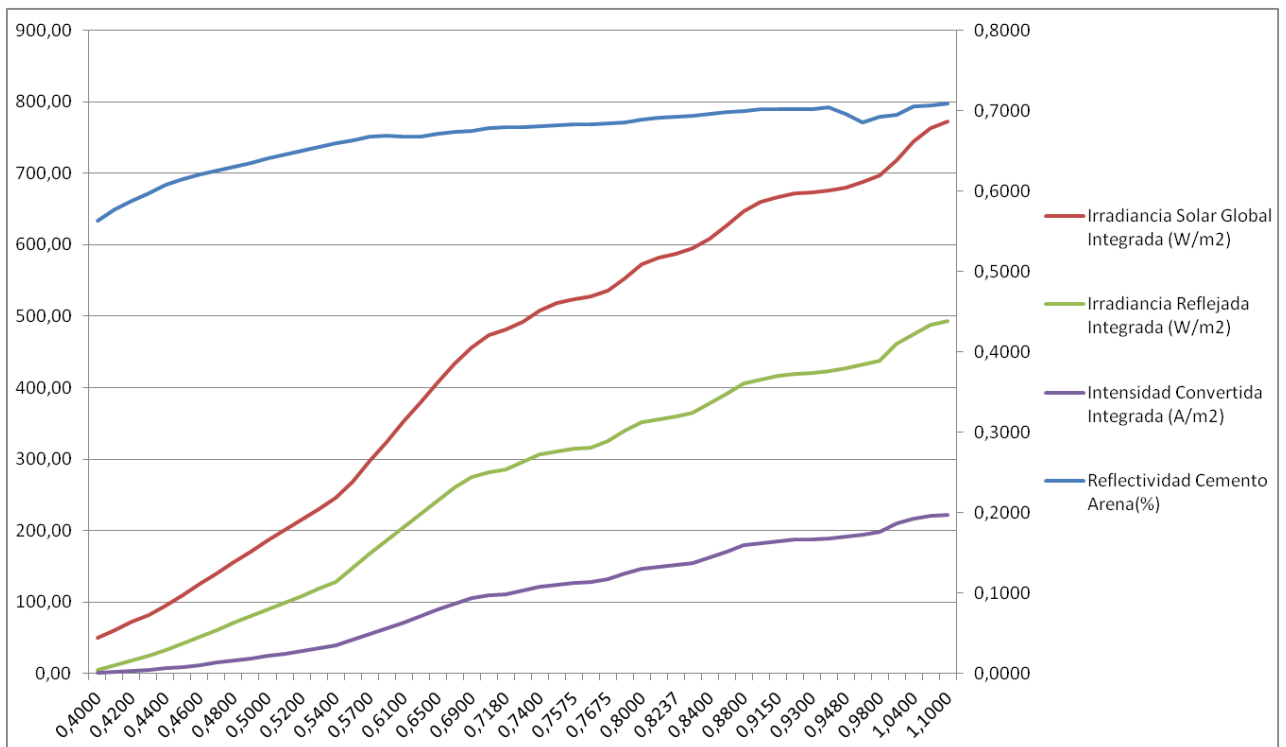


Figura C.24 Silicio Policristalino -Cemento Blanco con Arena-Intensidad Convertida Integrada [33]

• Cemento Blanco Puro:

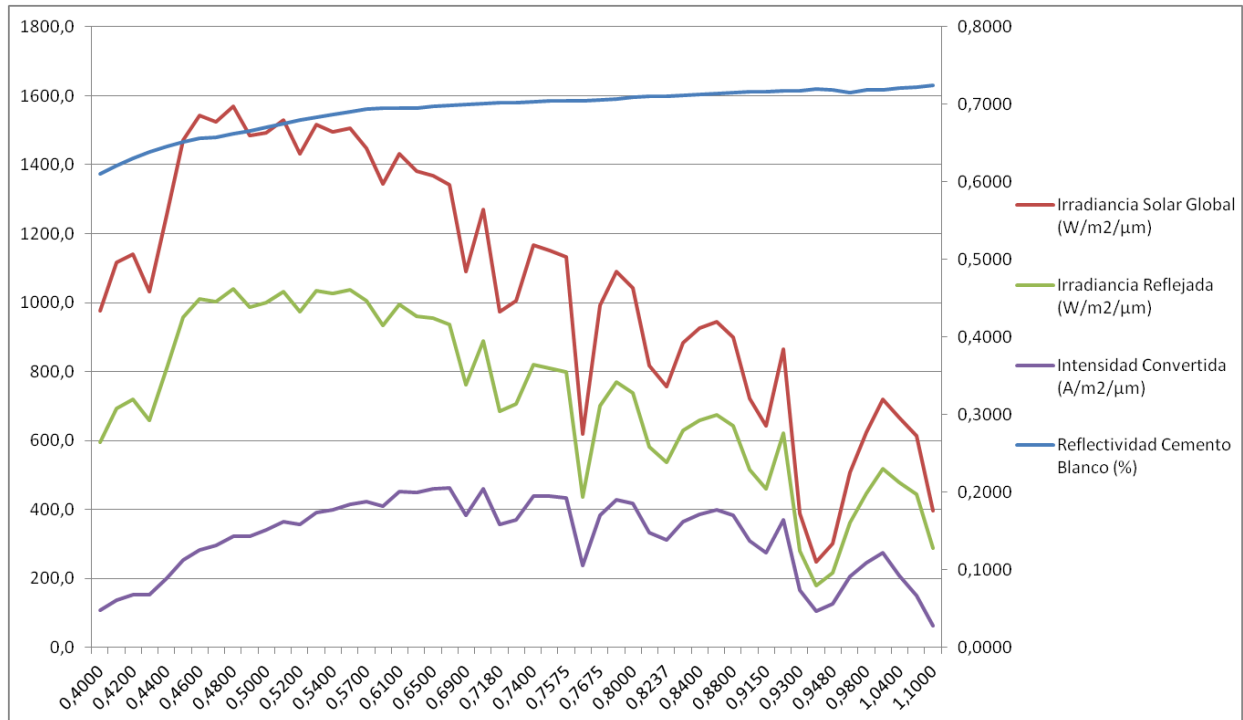


Figura C.25 Silicio Policristalino -Cemento Blanco Puro-Intensidad Convertida [33]

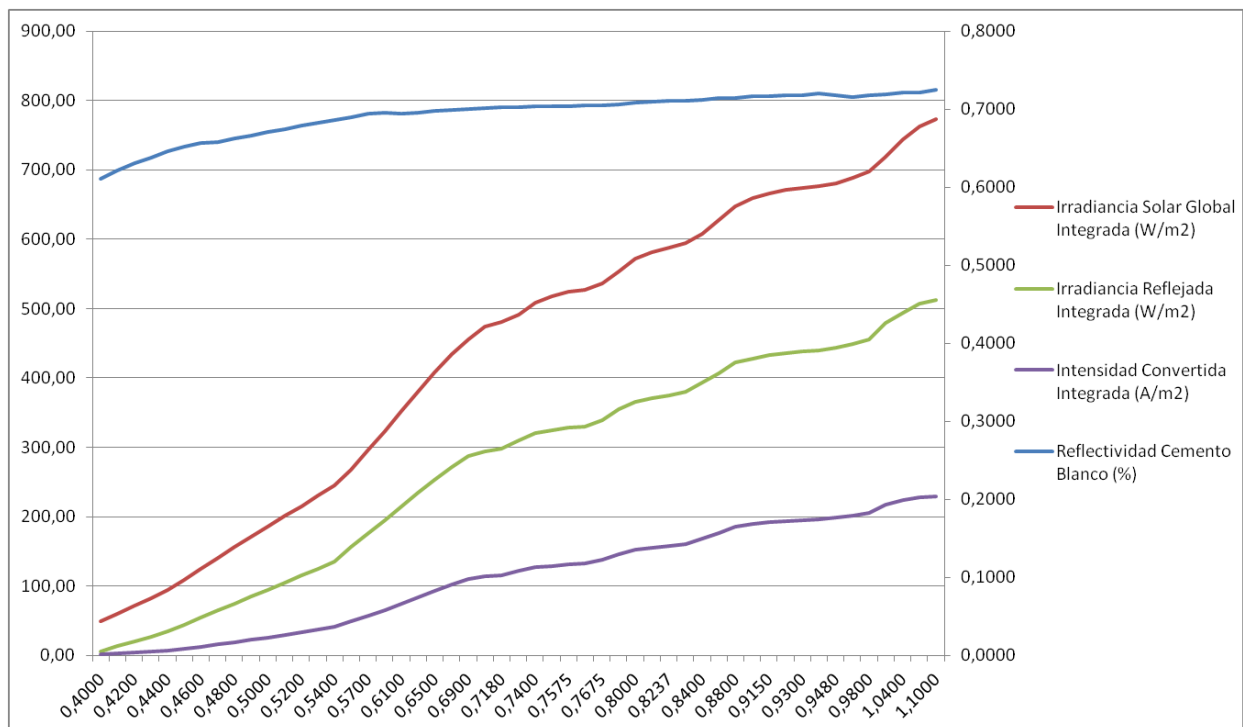


Figura C.26 Silicio Policristalino-Cemento Blanco Puro-Intensidad Convertida Integrada [33]

Silicio Amorfo

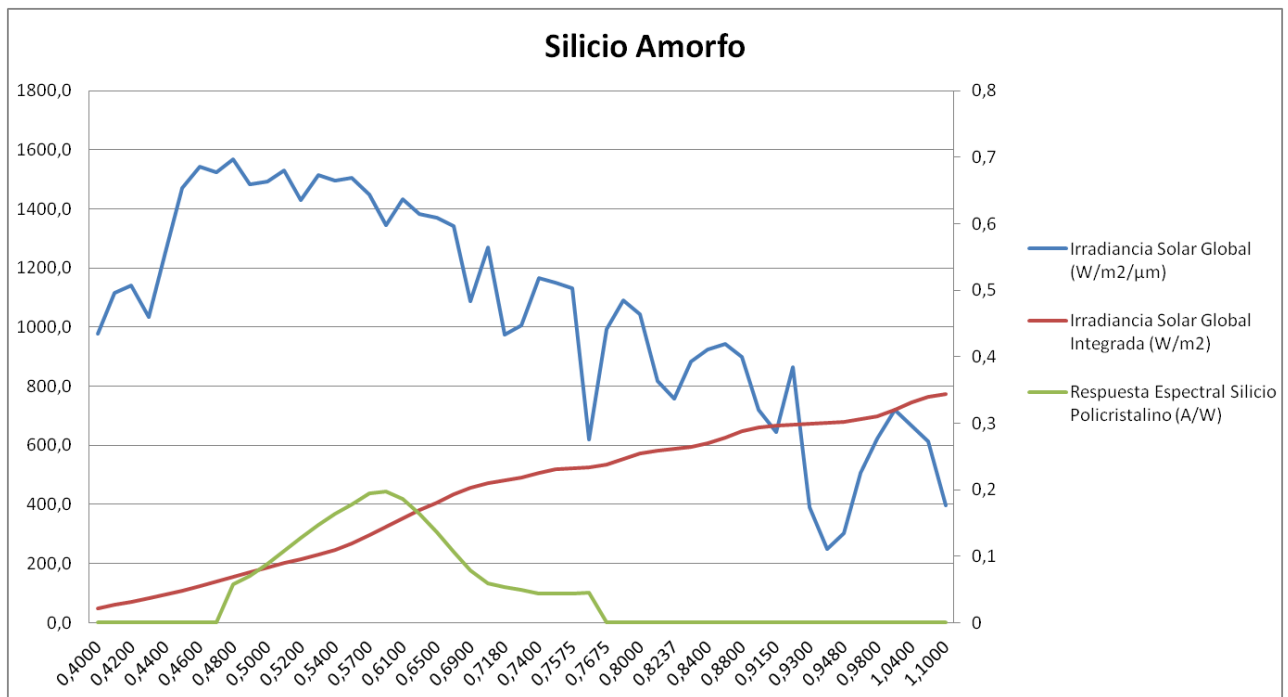


Figura C.27 Silicio Amorfo [33]

• Pintura Acrílica:

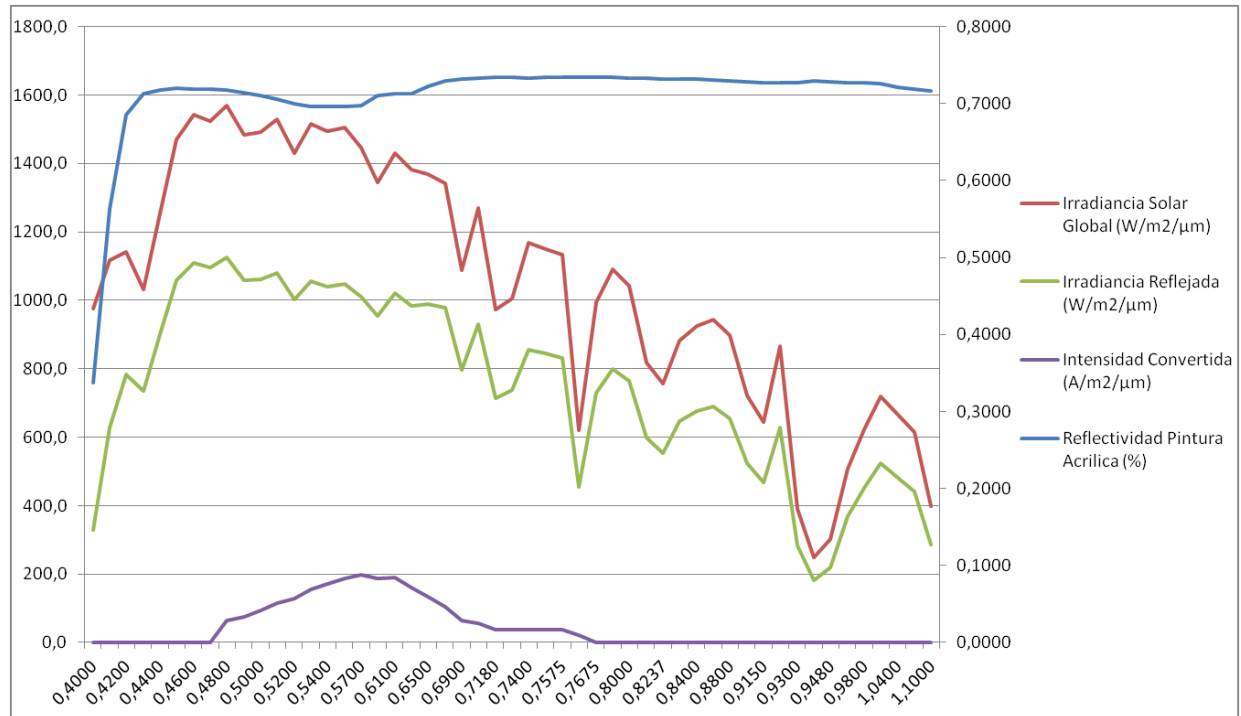


Figura C.28 Silicio Amorfo-Pintura Acrílica-Intensidad Convertida [33]

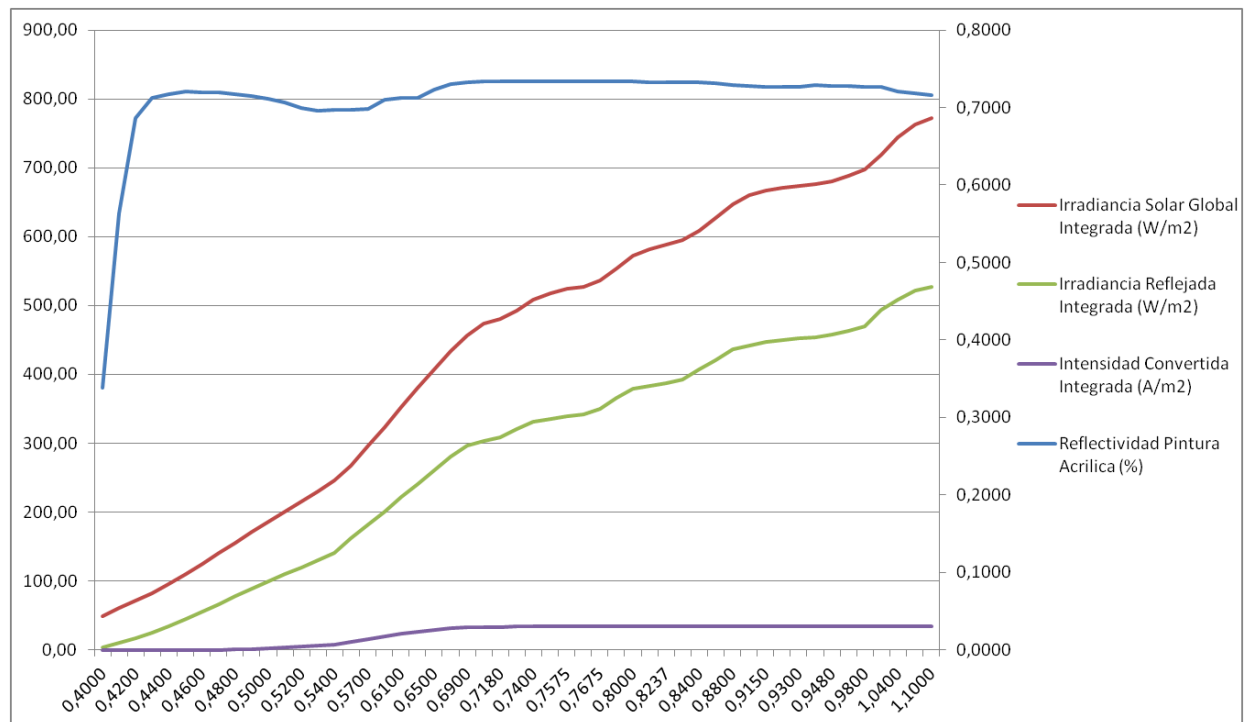


Figura C.29 Silicio Amorfo-Pintura Acrílica-Intensidad Convertida Integrada [33]

• Aluminio Lacado:

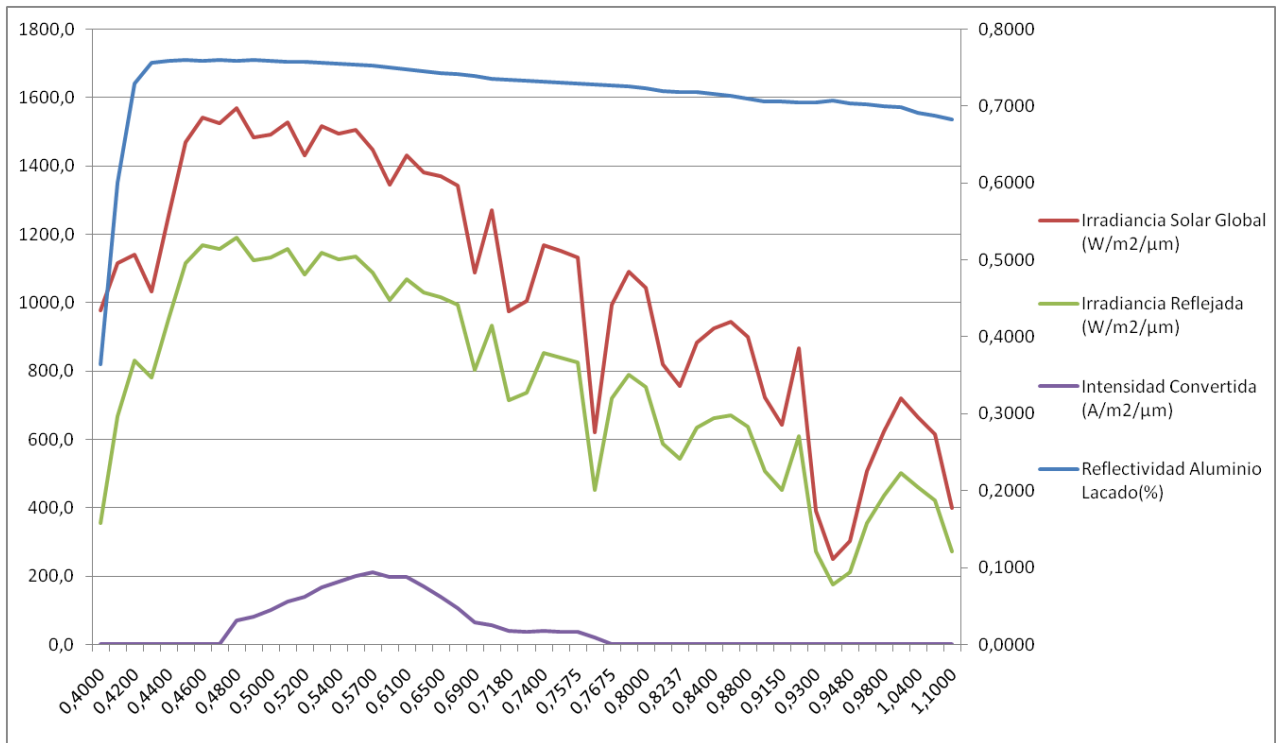


Figura C.30 Silicio Amorfo-Aluminio Lacado-Intensidad Convertida [33]

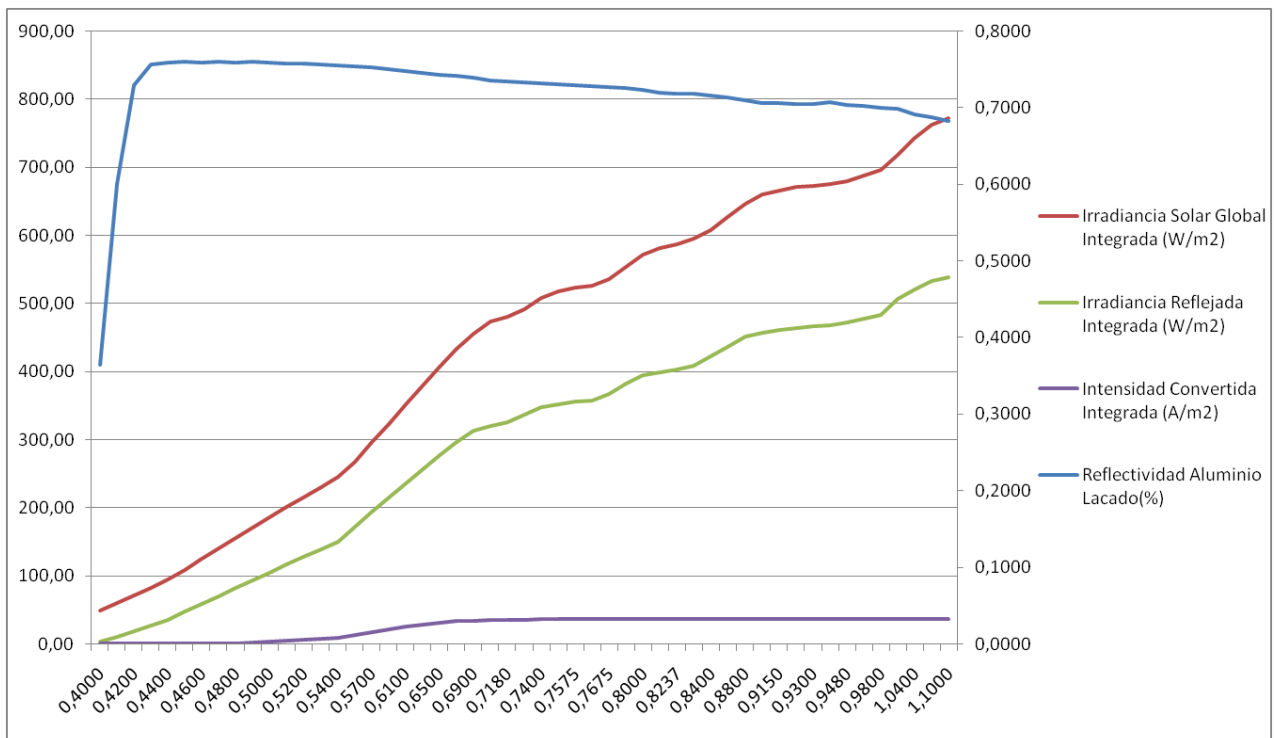


Figura C.31 Silicio Amorfo-Aluminio Lacado-Intensidad Convertida Integrada [33]

• Aluminio Anodizado:

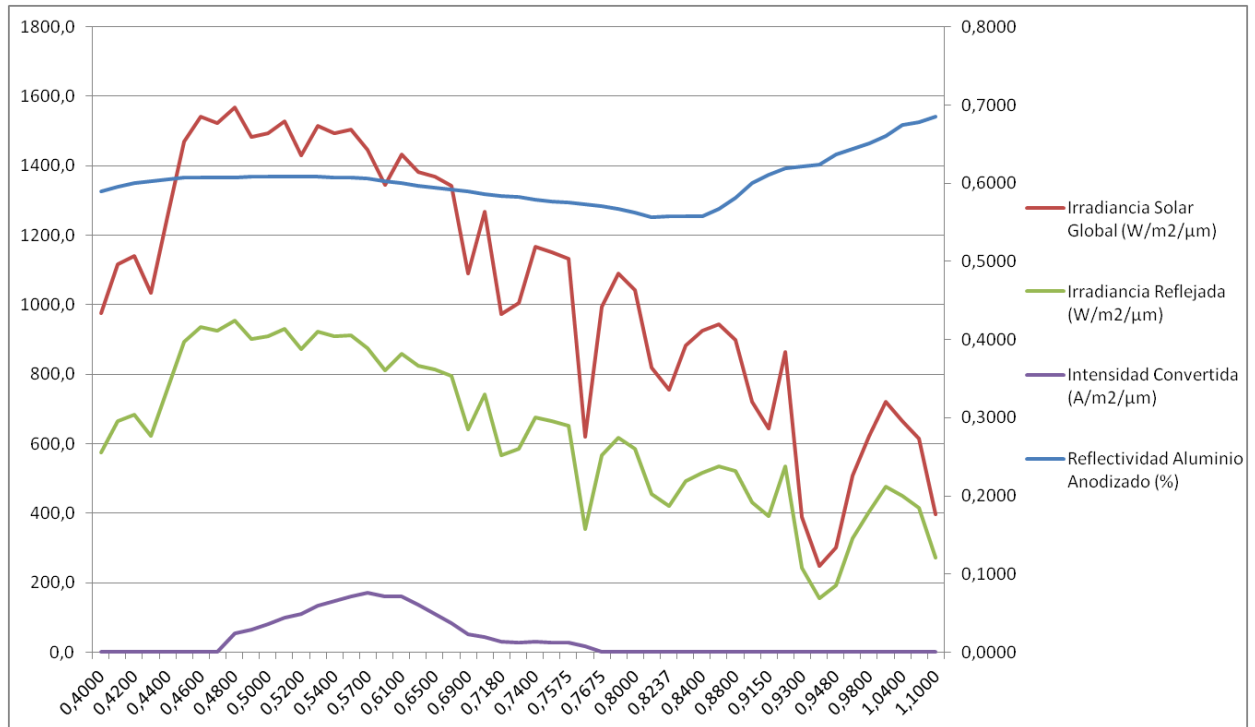


Figura C.32 Silicio Amorfo-Aluminio Anodizado-Intensidad Convertida [33]

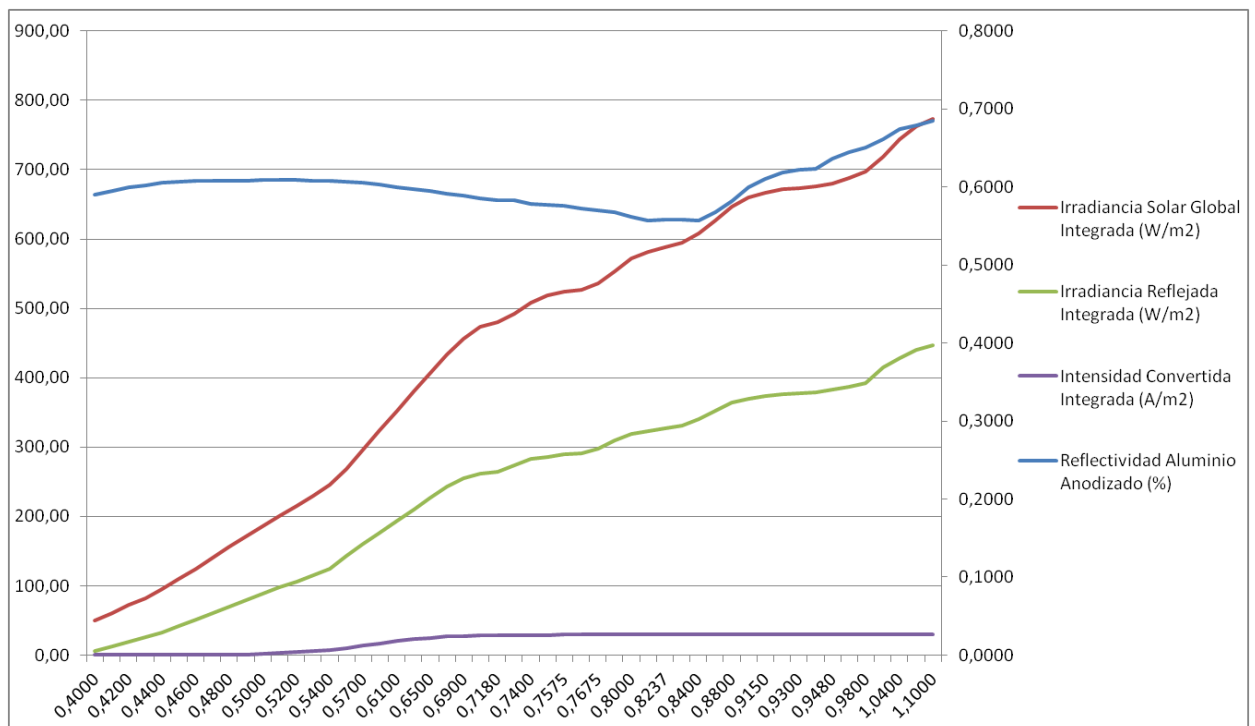


Figura C.33 Silicio Amorfo-Aluminio Anodizado-Intensidad Convertida Integrada [33]

• Pintura de Dióxido de Titanio:

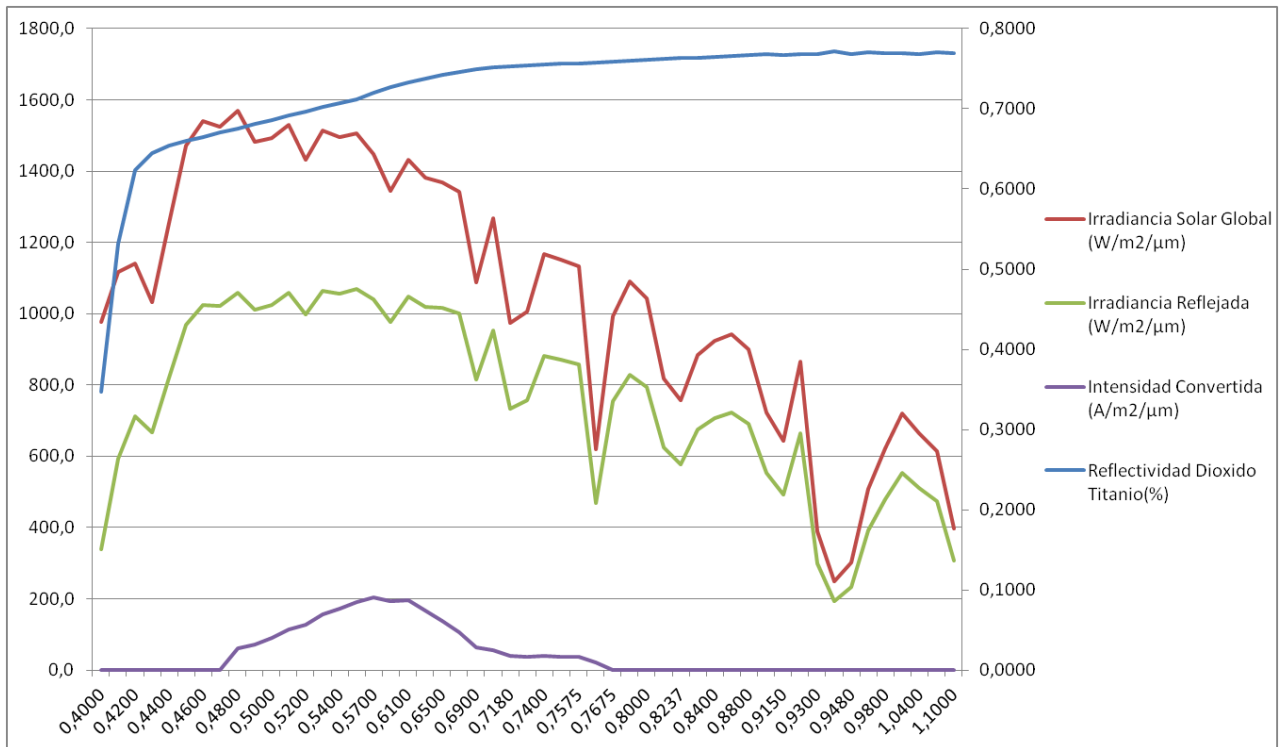


Figura C.34 Silicio Amorfo-Pintura de Dióxido de Titanio -Intensidad Convertida [33]

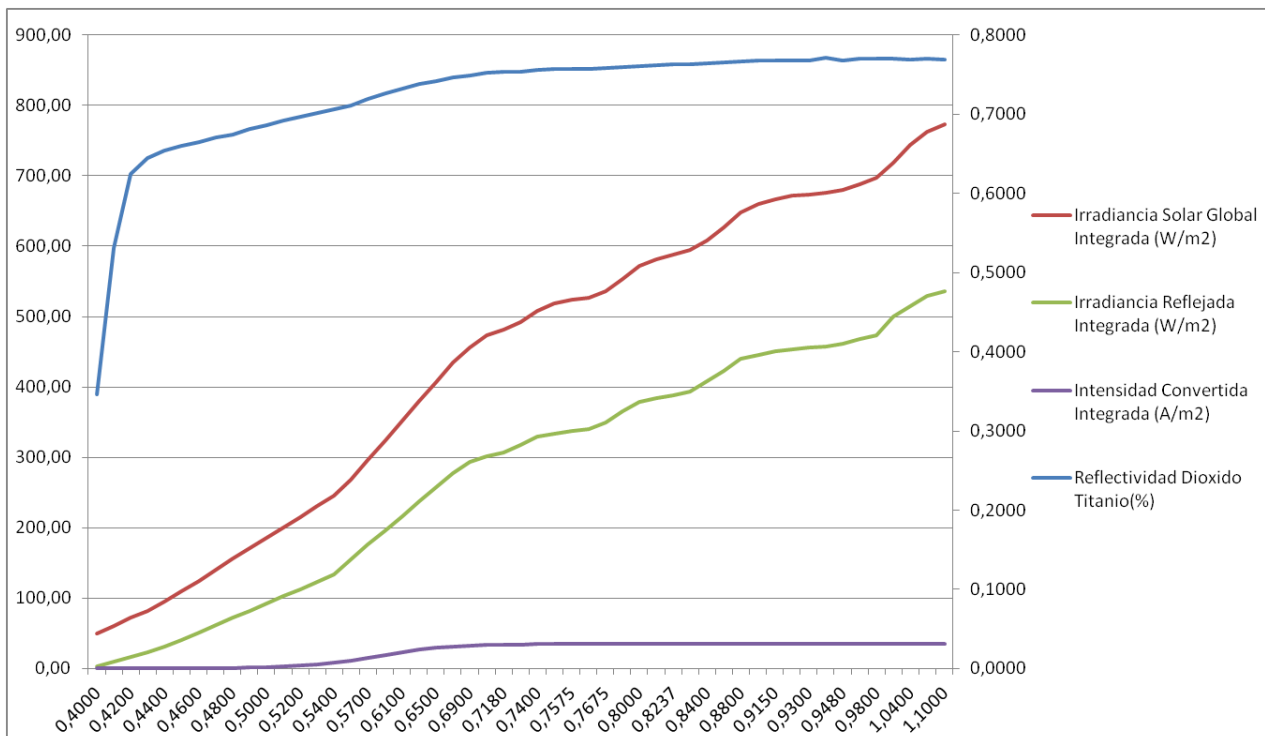


Figura C.35 Silicio Amorfo-Pintura de Dióxido de Titanio -Intensidad Convertida Integrada [33]

• Cemento Blanco con Arena:



Figura C.36 Silicio Amorfo-Cemento Blanco con Arena-Intensidad Convertida [33]

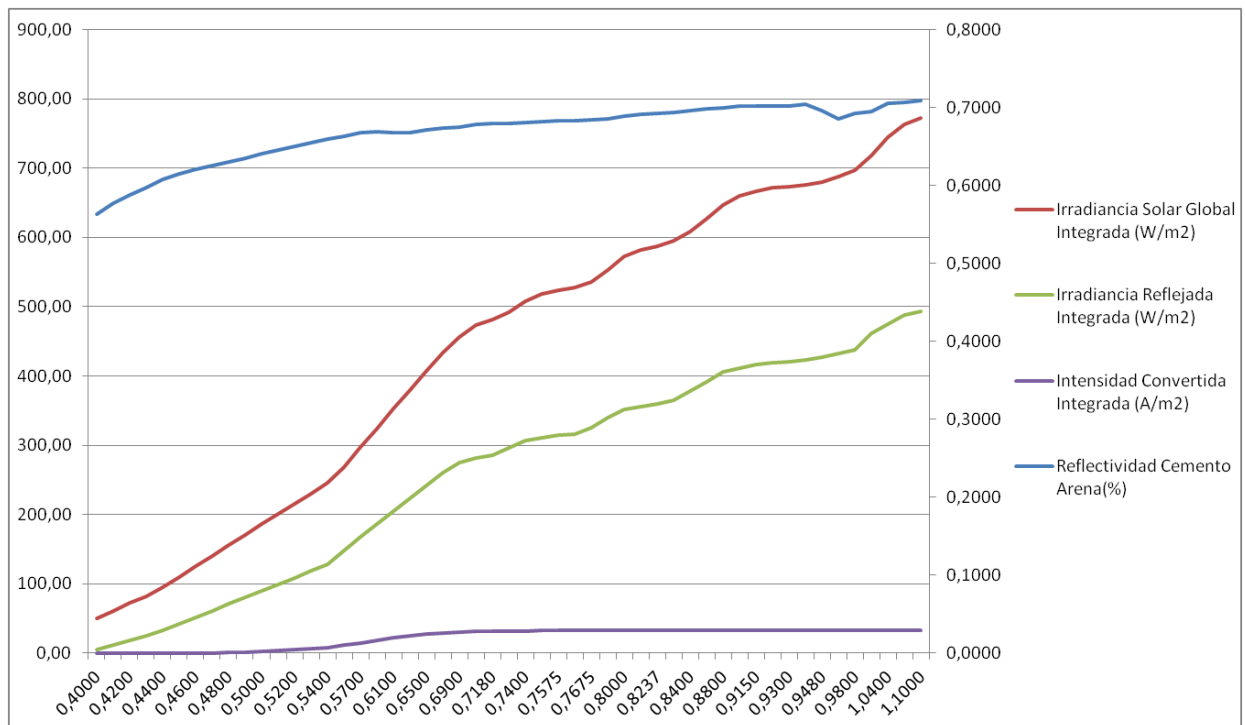


Figura C.37 Silicio Amorfo-Cemento Blanco con Arena-Intensidad Convertida Integrada [33]

• Cemento Blanco Puro:



Figura C.38 Silicio Amorfo-Cemento Blanco Puro-Intensidad Convertida [33]

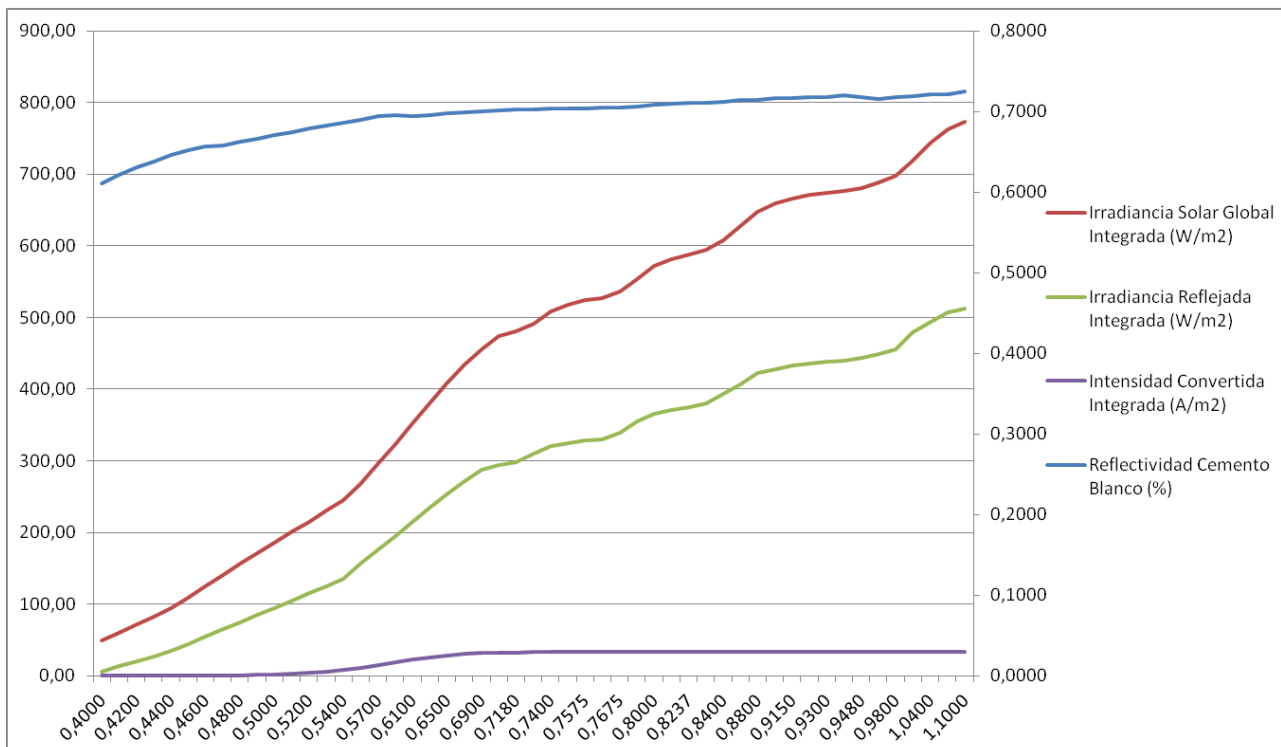


Figura C.39 Silicio Amorfo-Cemento Blanco Puro-Intensidad Convertida Integrada [33]

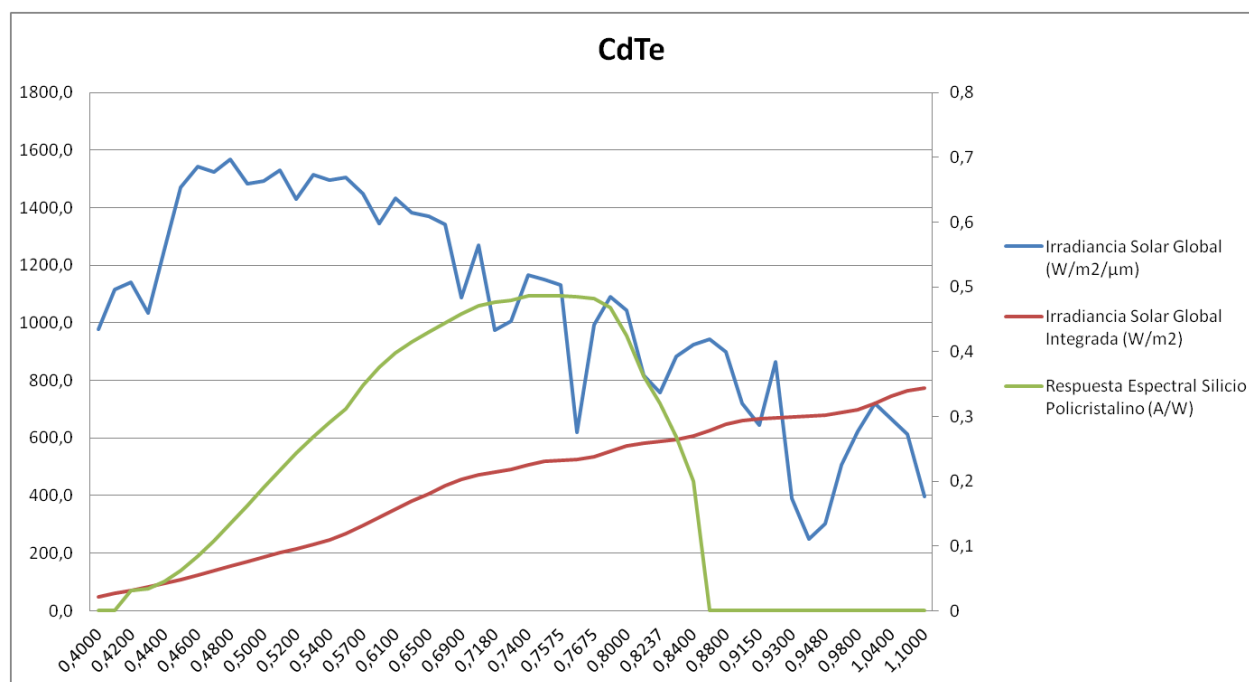
CdTe

Figura C.40 CdTe [33]

• Pintura Acrílica:

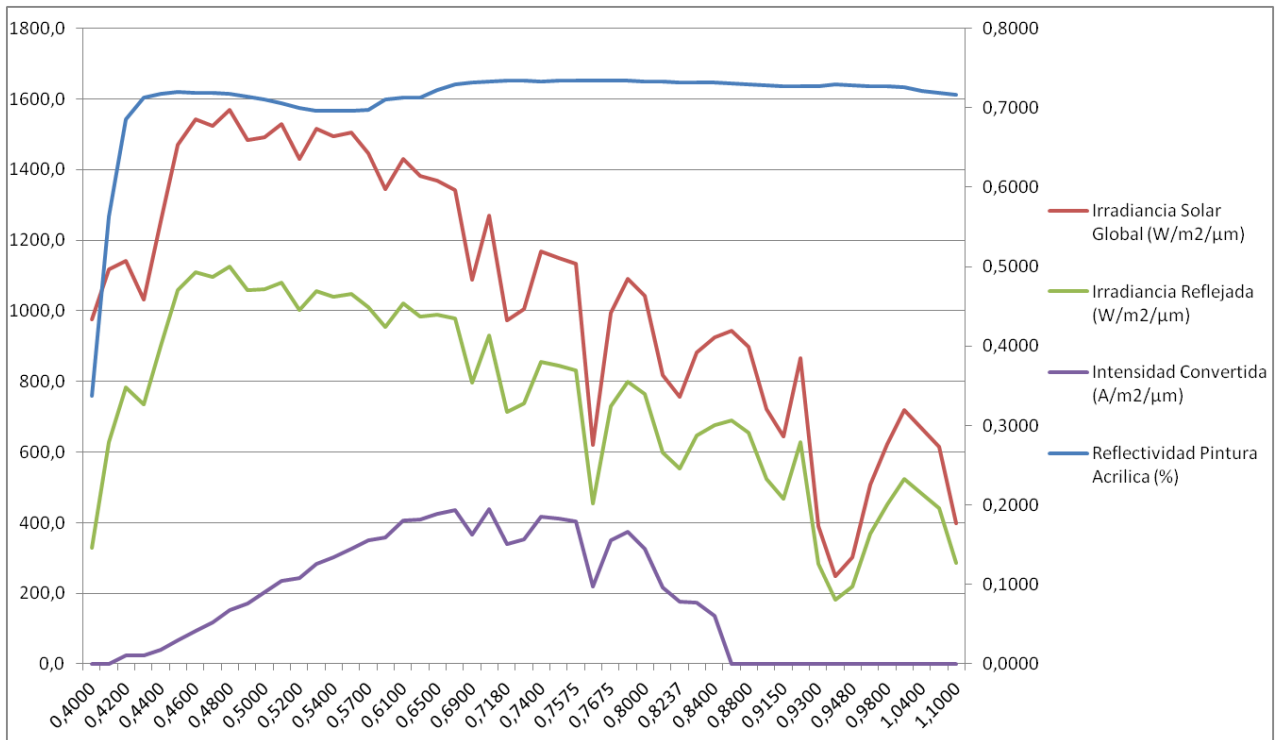


Figura C.41 CdTe-Pintura Acrílica-Intensidad Convertida [33]

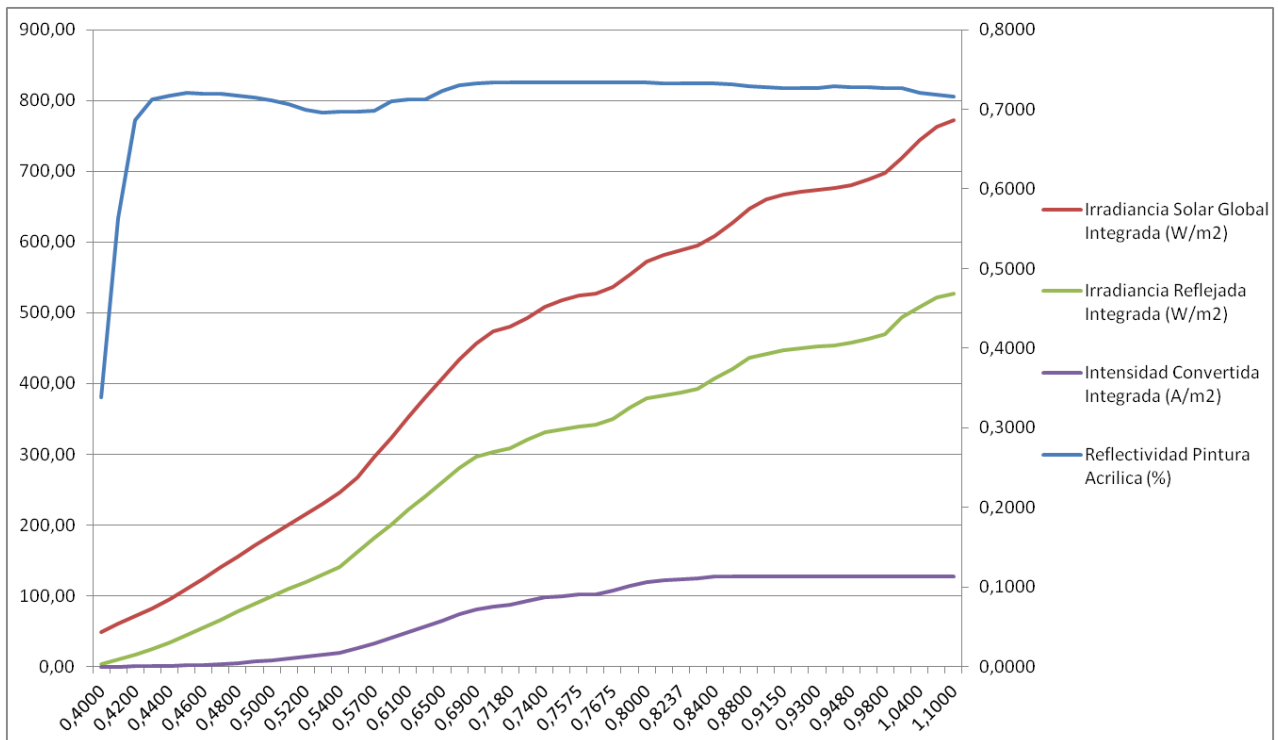


Figura C.42 CdTe-Pintura Acrílica-Intensidad Convertida Integrada [33]

• Aluminio Lacado:

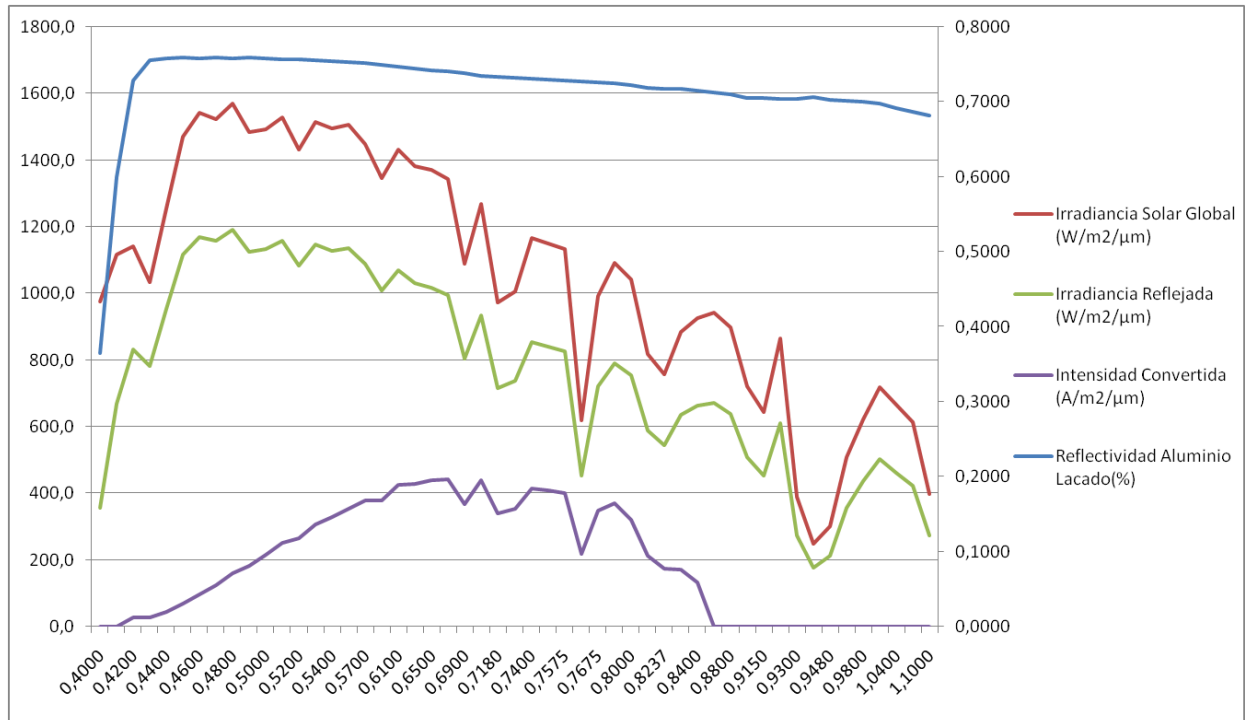


Figura C.43 CdTe-Aluminio Lacado-Intensidad Convertida [33]

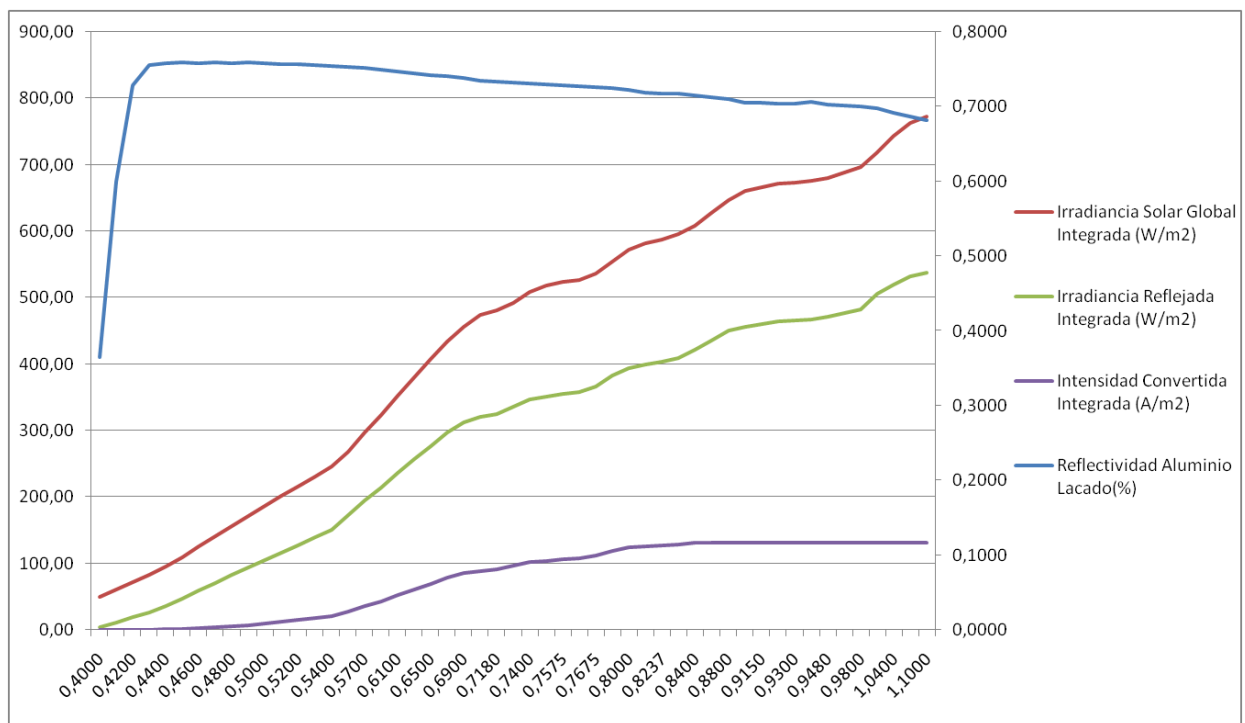


Figura C.44 CdTe-Aluminio Lacado-Intensidad Convertida Integrada [33]

• Aluminio Anodizado:

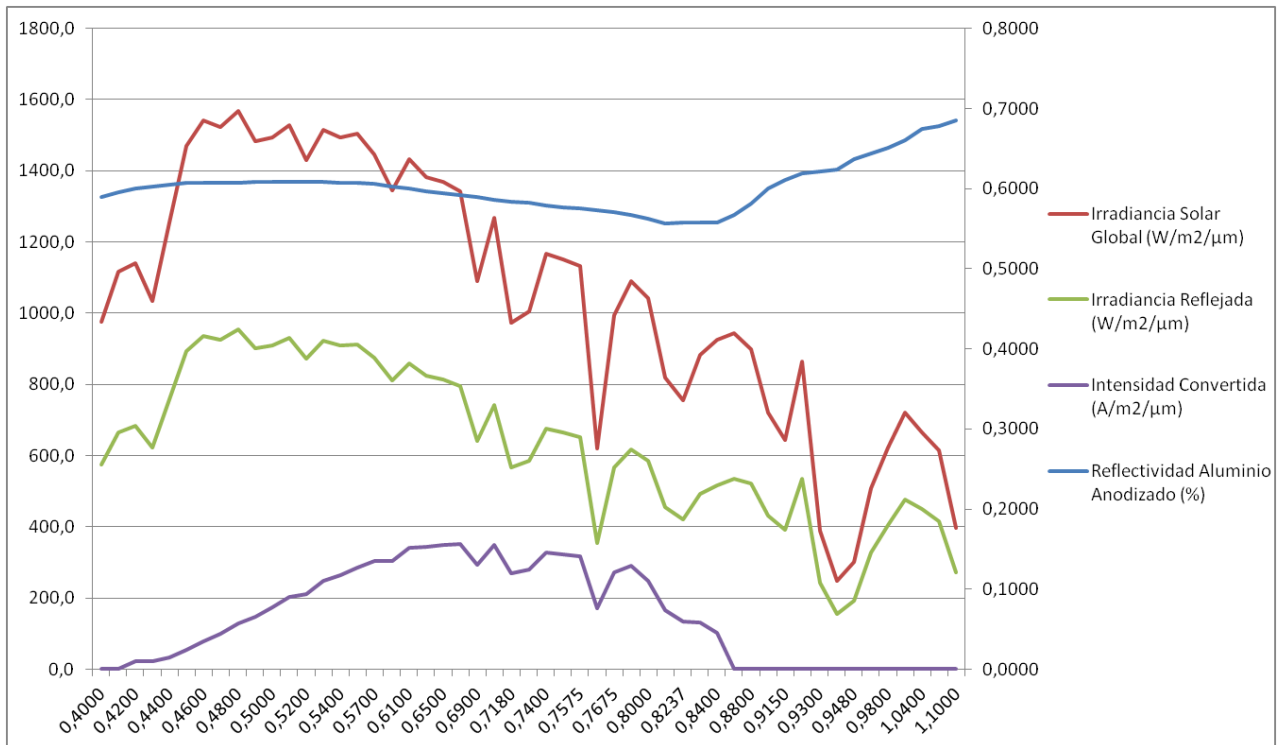


Figura C.45 CdTe-Aluminio Anodizado-Intensidad Convertida [33]

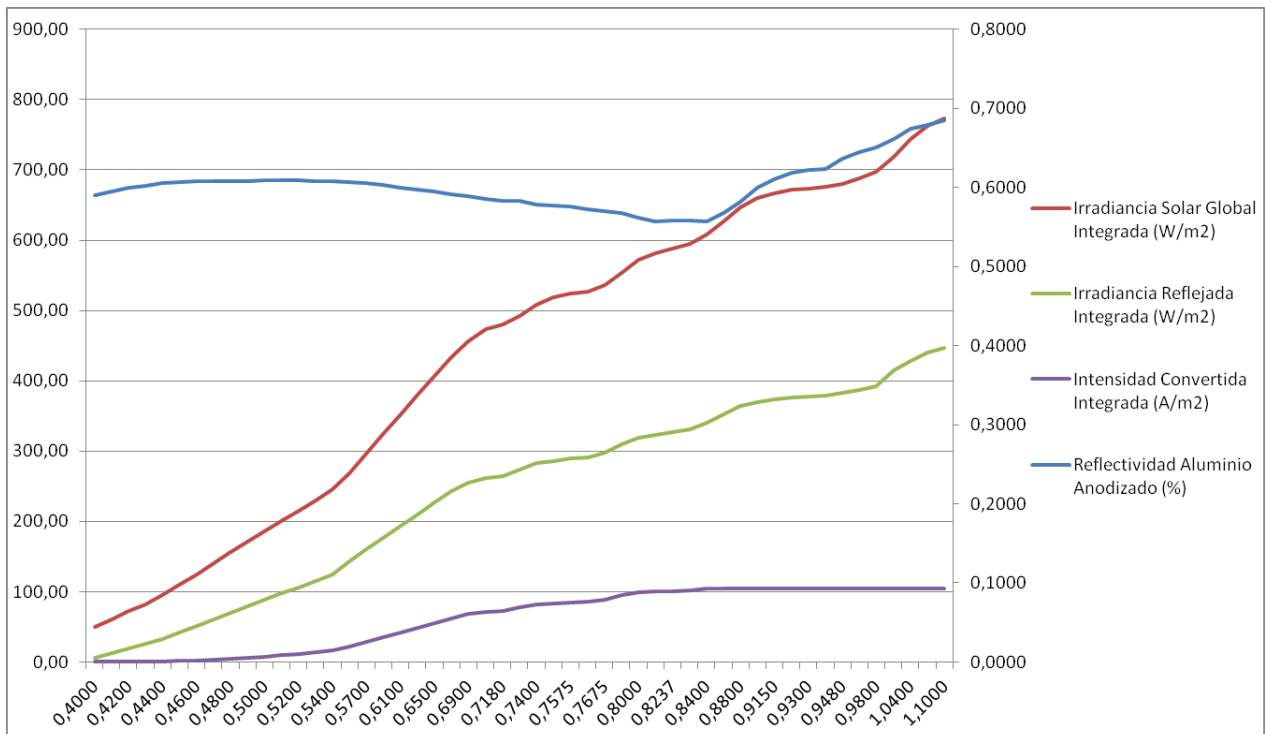


Figura C.46 CdTe-Aluminio Anodizado-Intensidad Convertida Integrada [33]

• Pintura de Dióxido de Titanio:

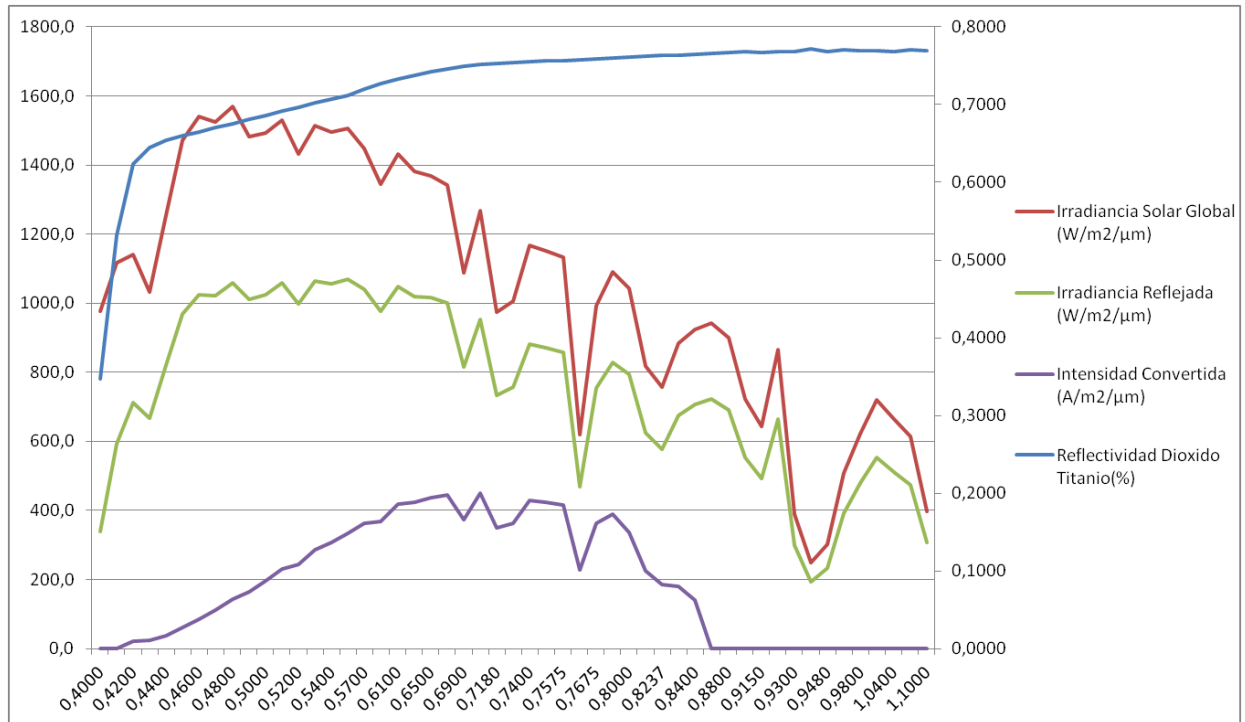


Figura C.47 CdTe-Pintura de Dióxido de Titanio -Intensidad Convertida [33]

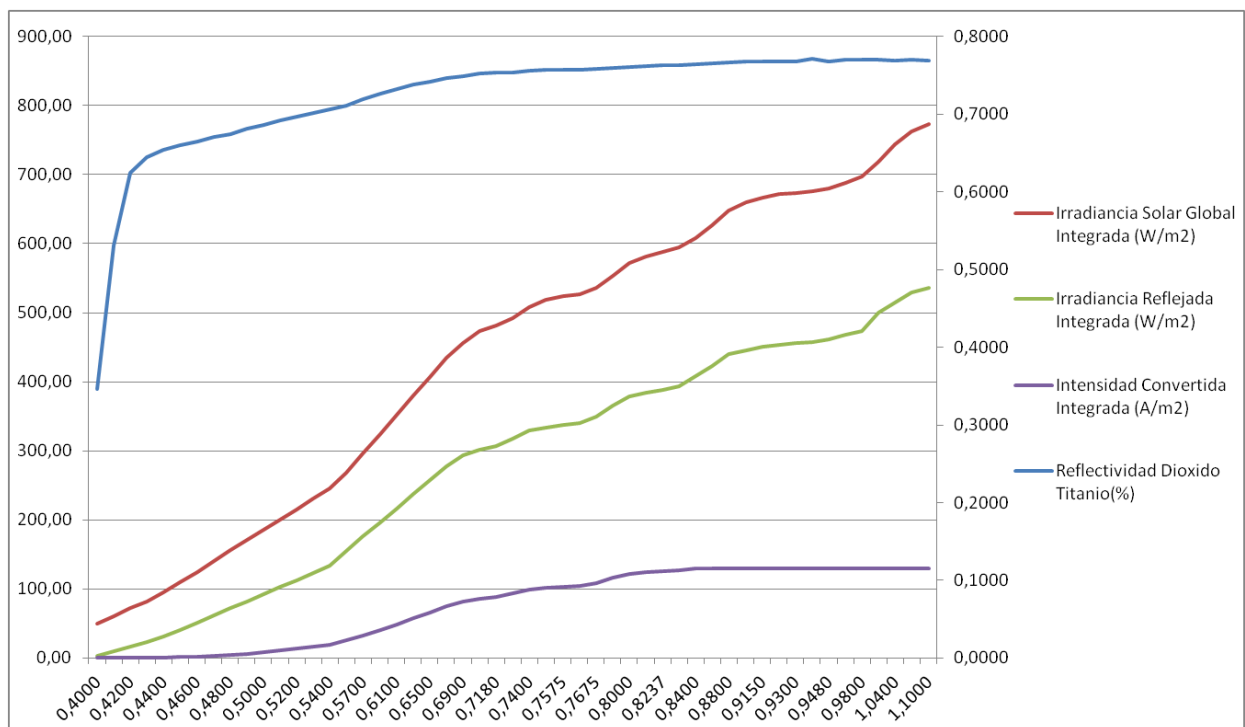


Figura C.48 CdTe-Pintura de Dióxido de Titanio -Intensidad Convertida Integrada [33]

• Cemento Blanco con Arena:

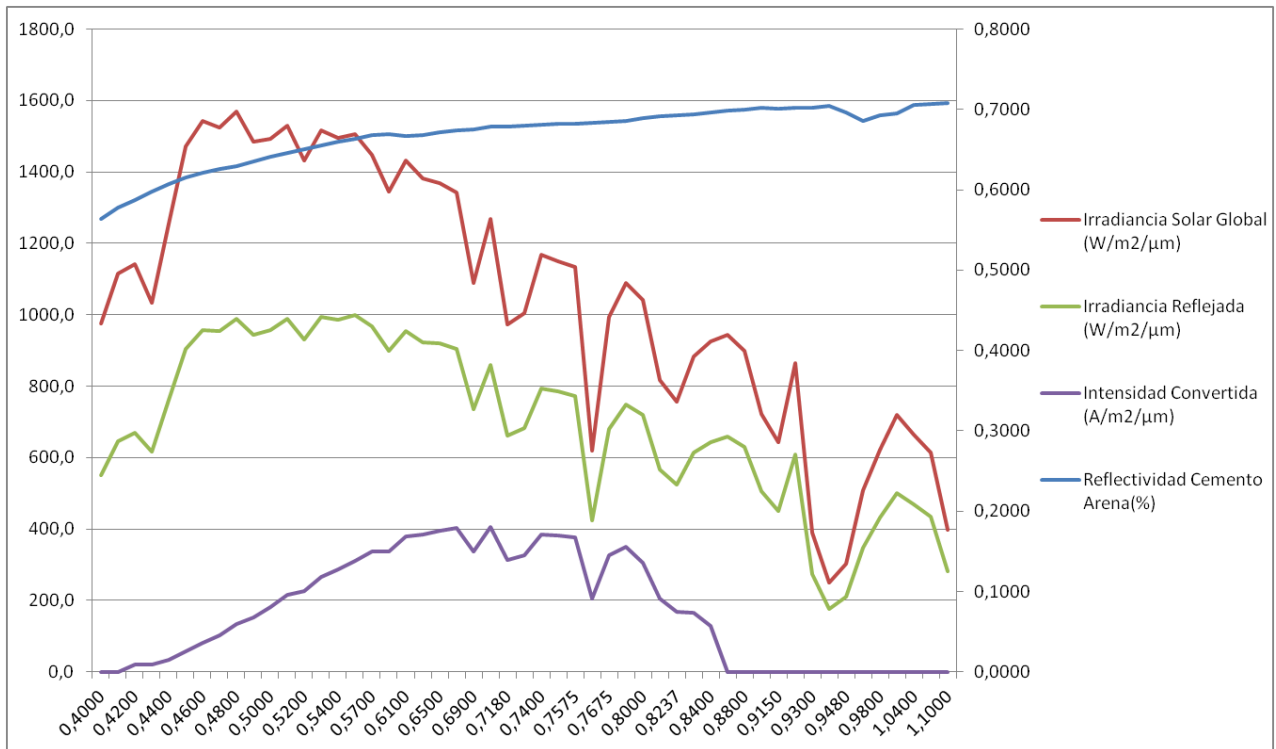


Figura C.49 CdTe-Cemento Blanco con Arena-Intensidad Convertida [33]

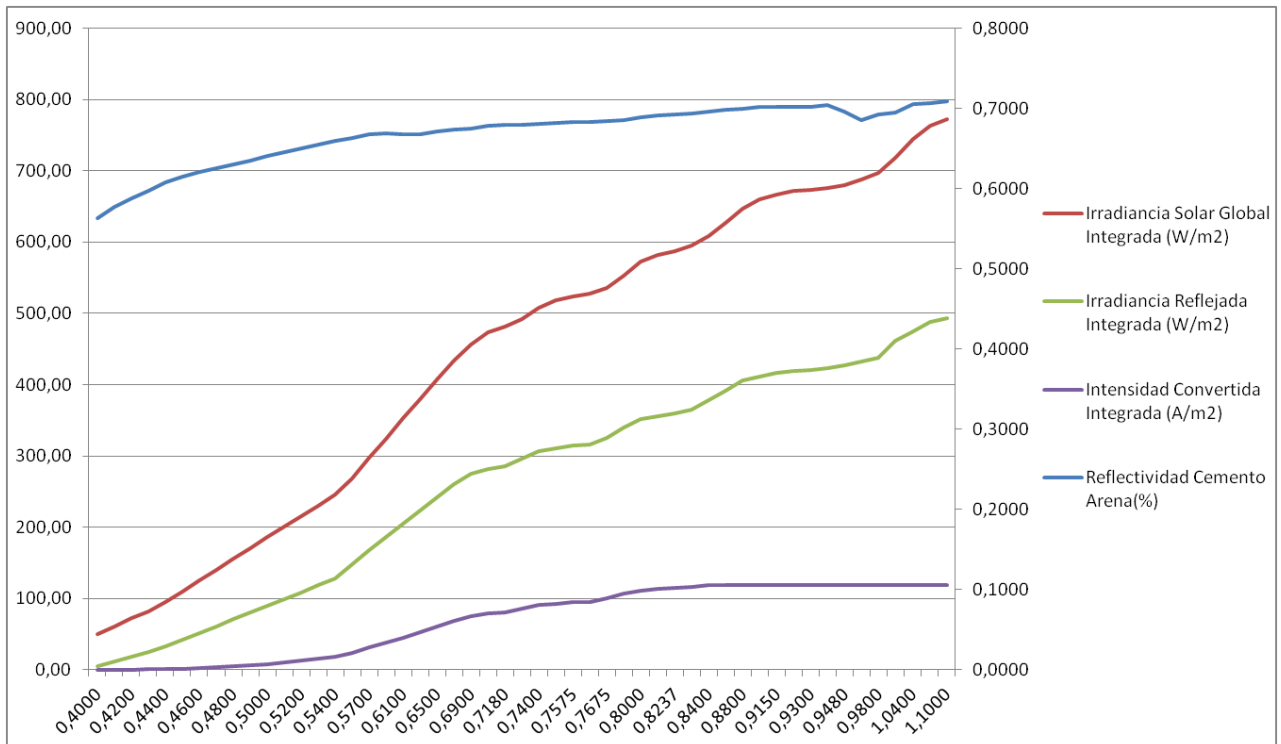


Figura C.50 CdTe-Cemento Blanco con Arena-Intensidad Convertida Integrada [33]

• Cemento Blanco Puro:

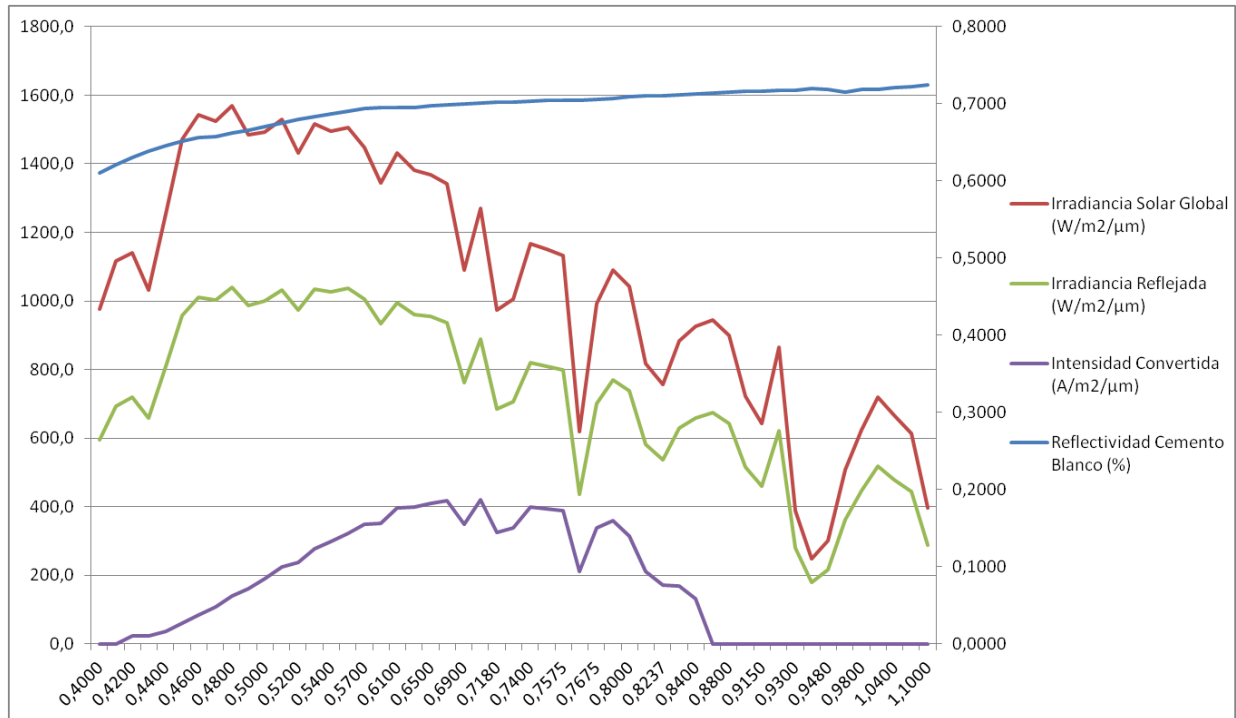


Figura C.51 CdTe-Cemento Blanco Puro-Intensidad Convertida [33]

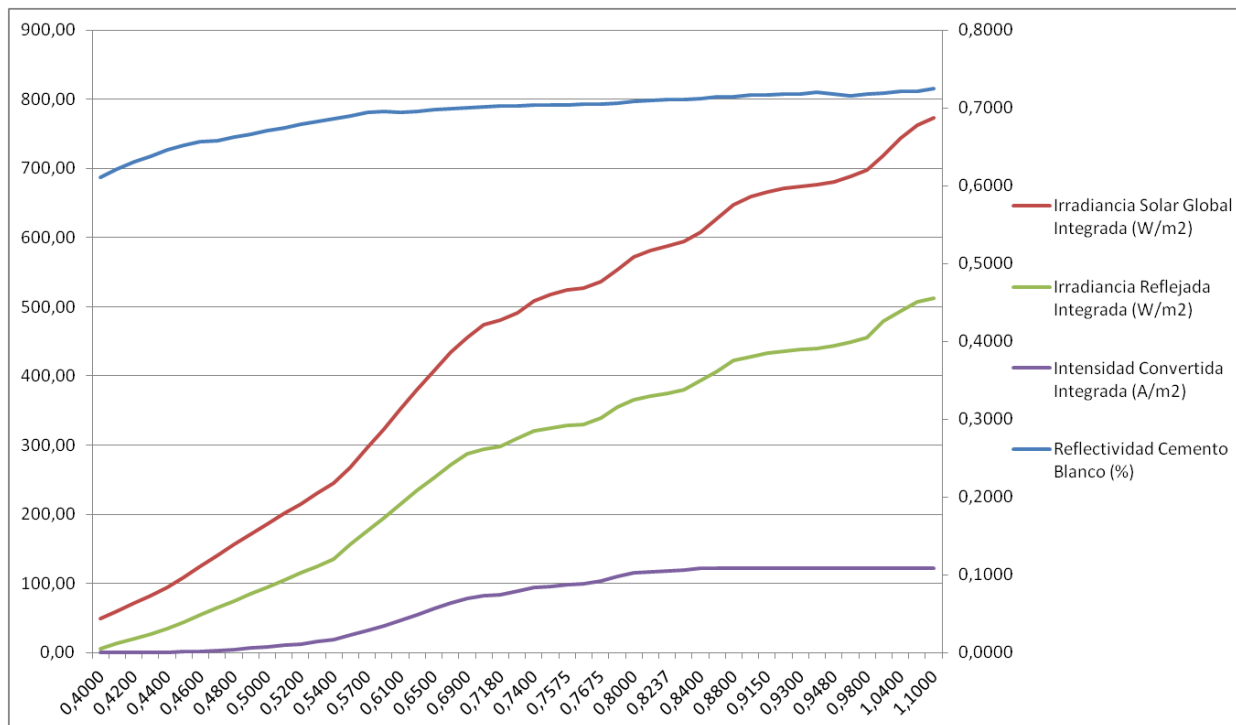


Figura C.52 CdTe-Cemento Blanco Puro-Intensidad Convertida Integrada [33]

CIGS

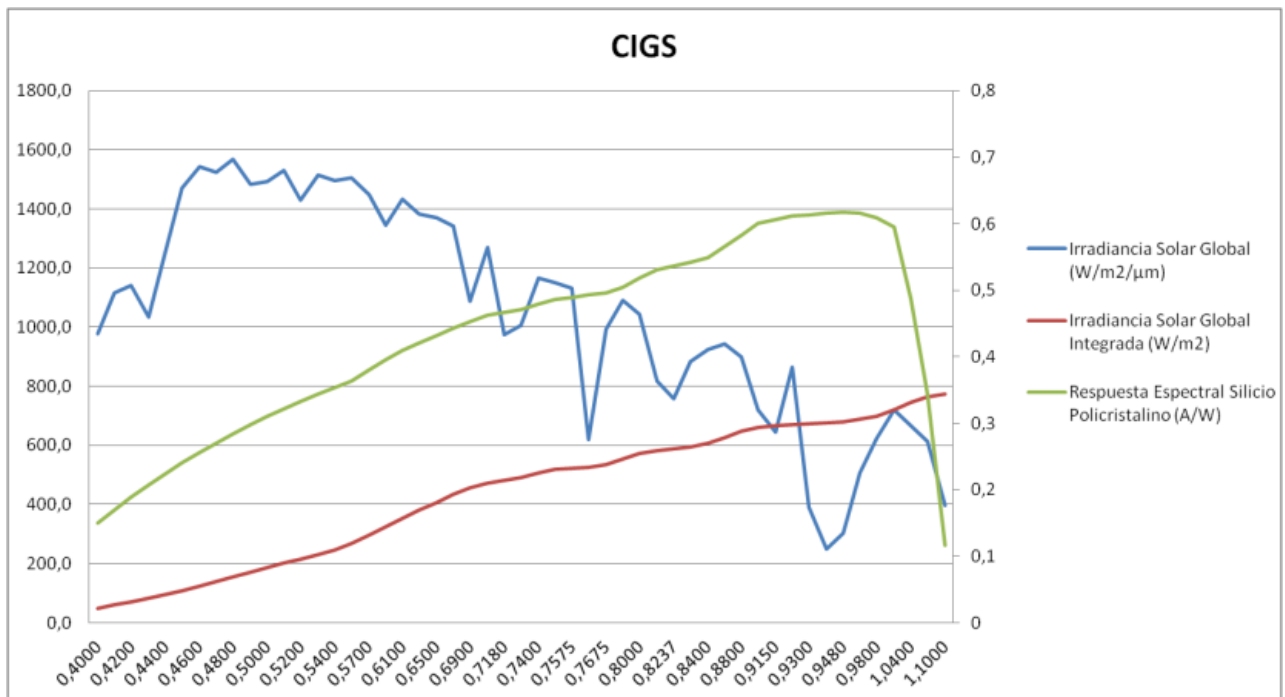


Figura C.53 CIGS [33]

• Pintura Acrílica:

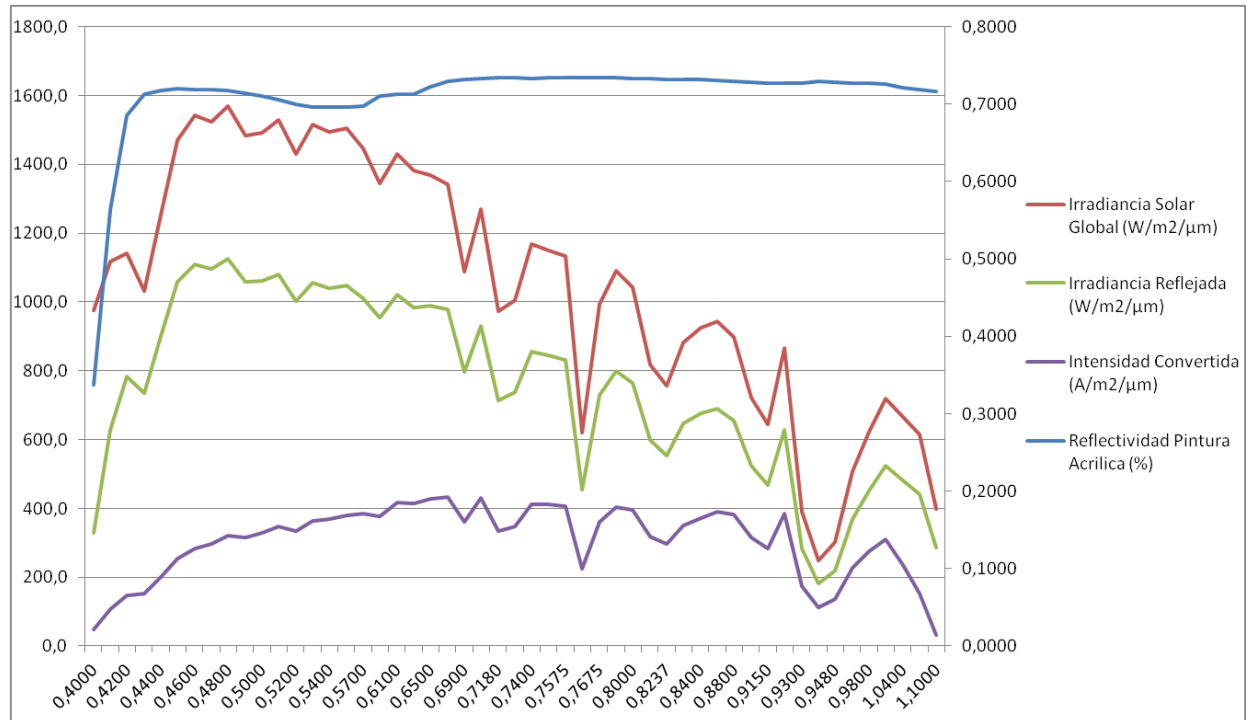


Figura C.54 CIGS-Pintura Acrílica-Intensidad Convertida [33]

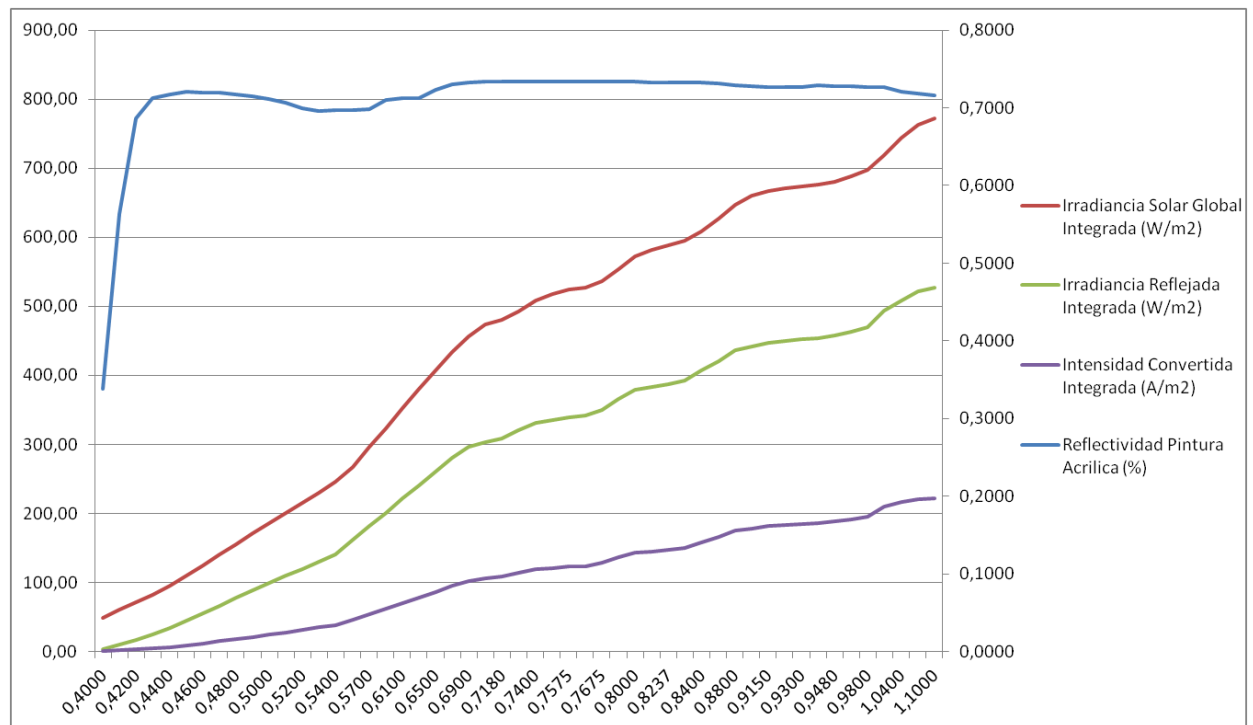


Figura C.55 CIGS-Pintura Acrílica-Intensidad Convertida Integrada [33]

• Aluminio Lacado:

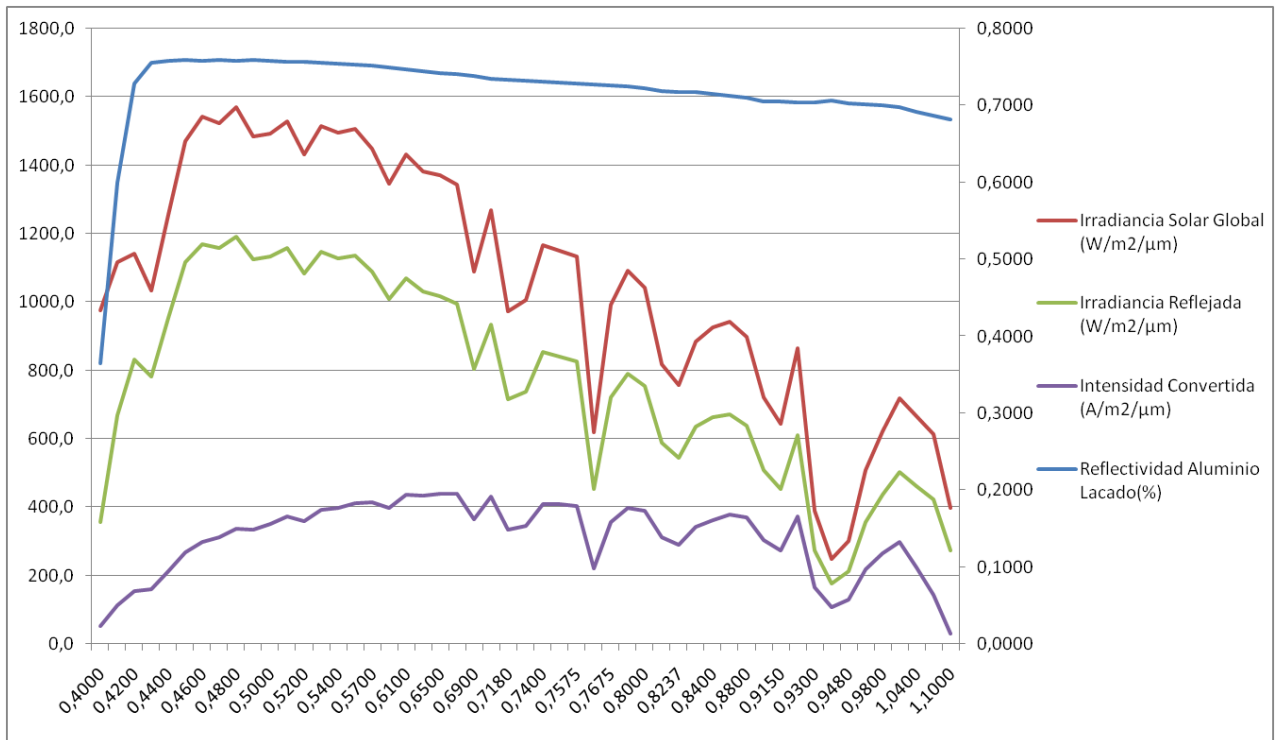


Figura C.56 CIGS-Aluminio Lacado-Intensidad Convertida [33]

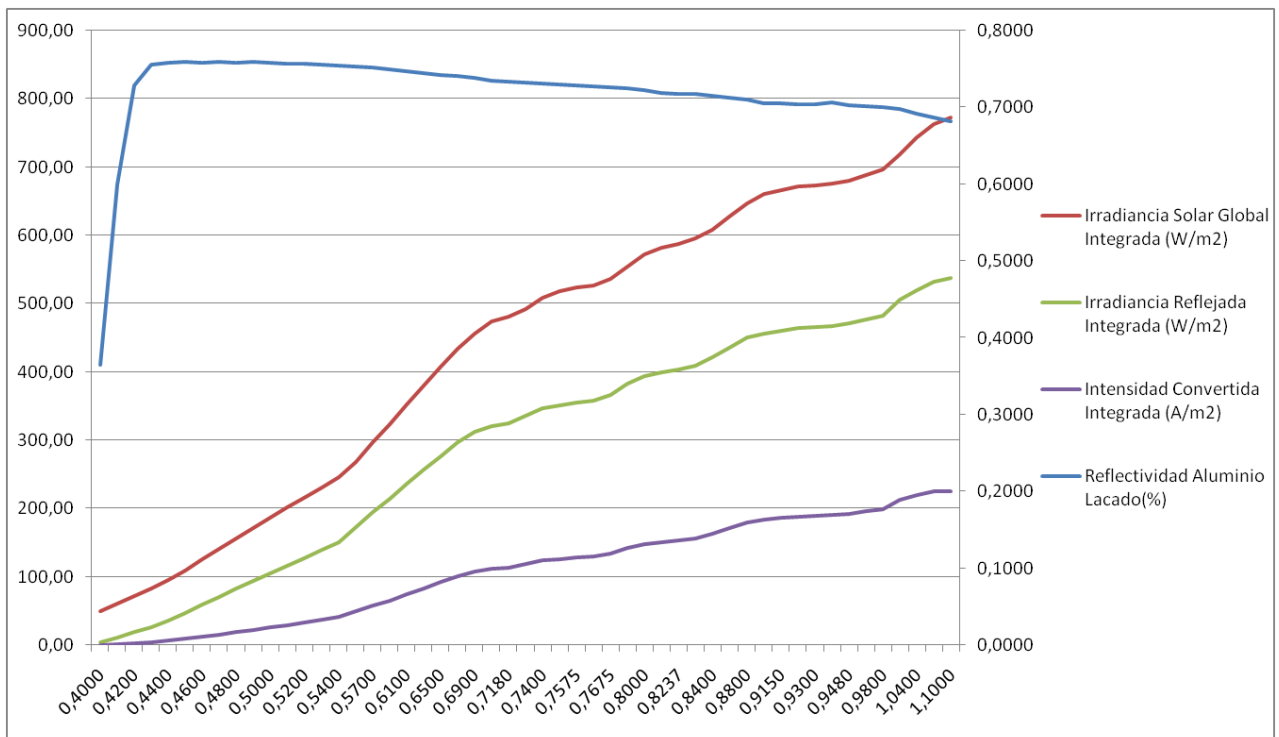


Figura C.57 CIGS-Aluminio Lacado-Intensidad Convertida Integrada [33]

• Aluminio Anodizado:



Figura C.58 CIGS-Aluminio Anodizado-Intensidad Convertida [33]

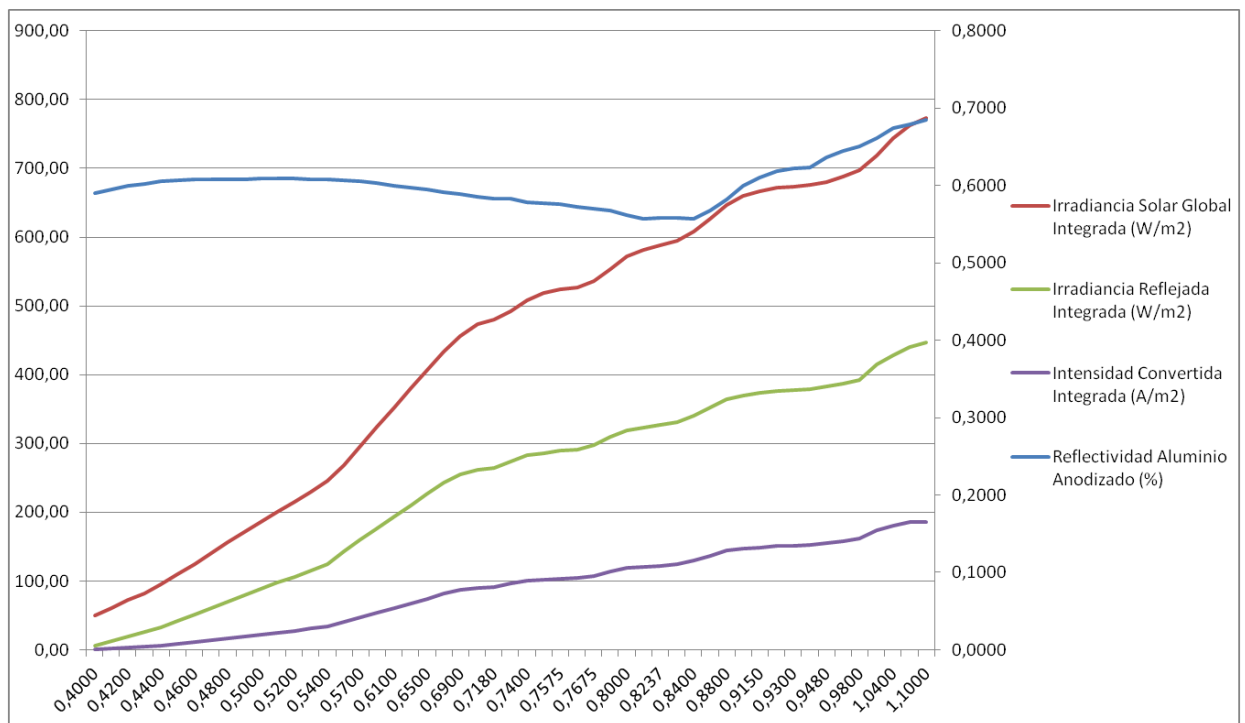


Figura C.59 CIGS-Aluminio Anodizado-Intensidad Convertida Integrada [33]

• Pintura de Dióxido de Titanio:

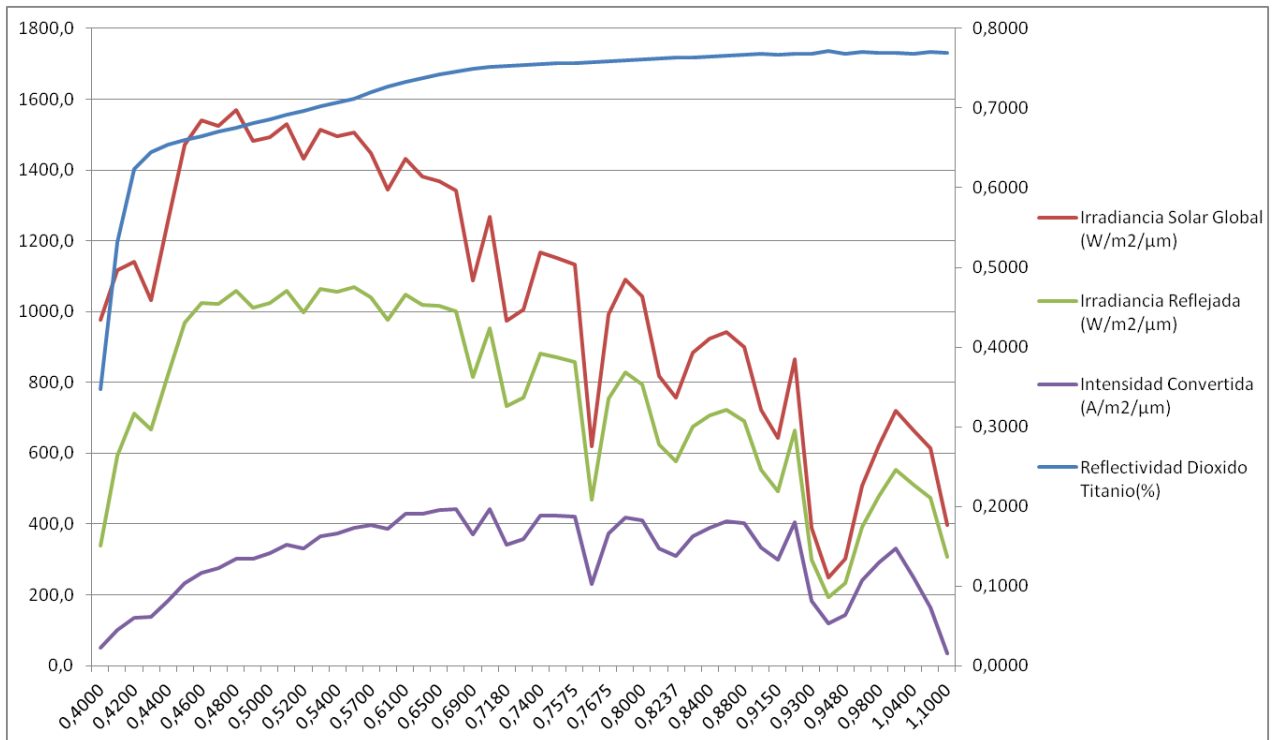


Figura C.60 CIGS-Pintura de Dióxido de Titanio -Intensidad Convertida [33]

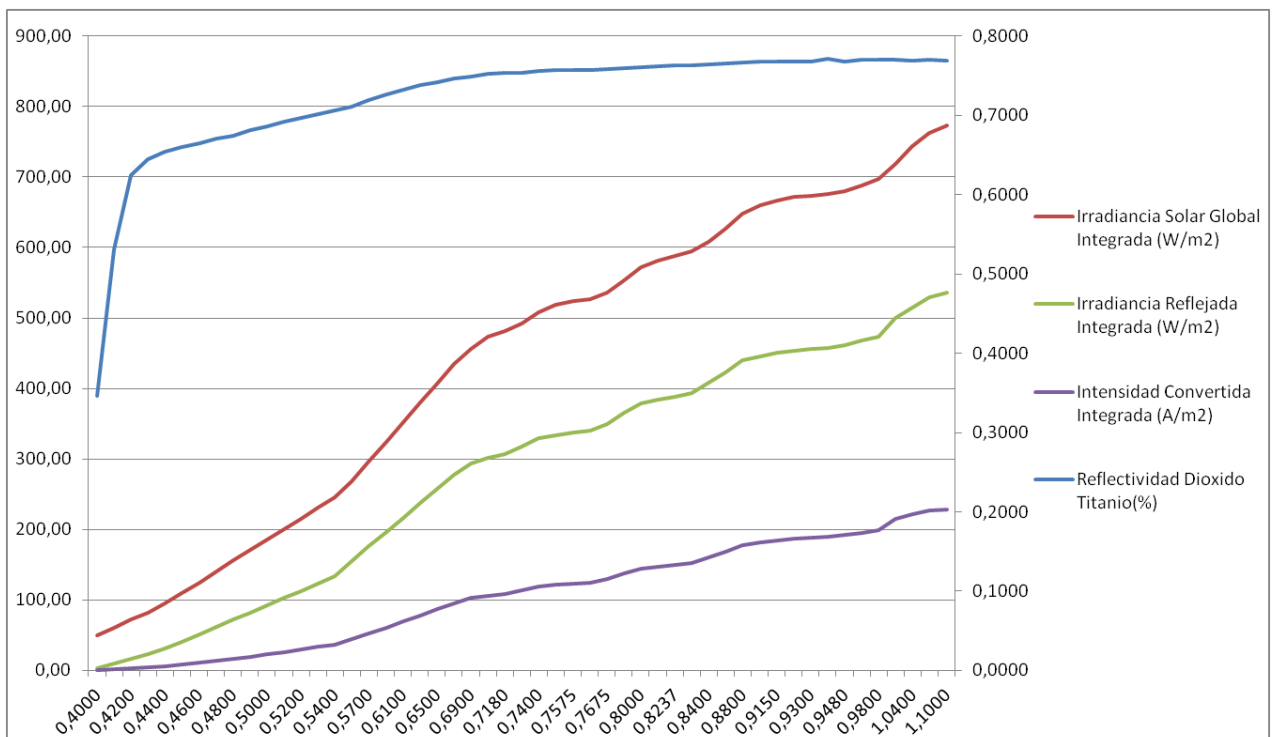


Figura C.61 CIGS-Pintura de Dióxido de Titanio -Intensidad Convertida Integrada [33]

• Cemento Blanco con Arena:

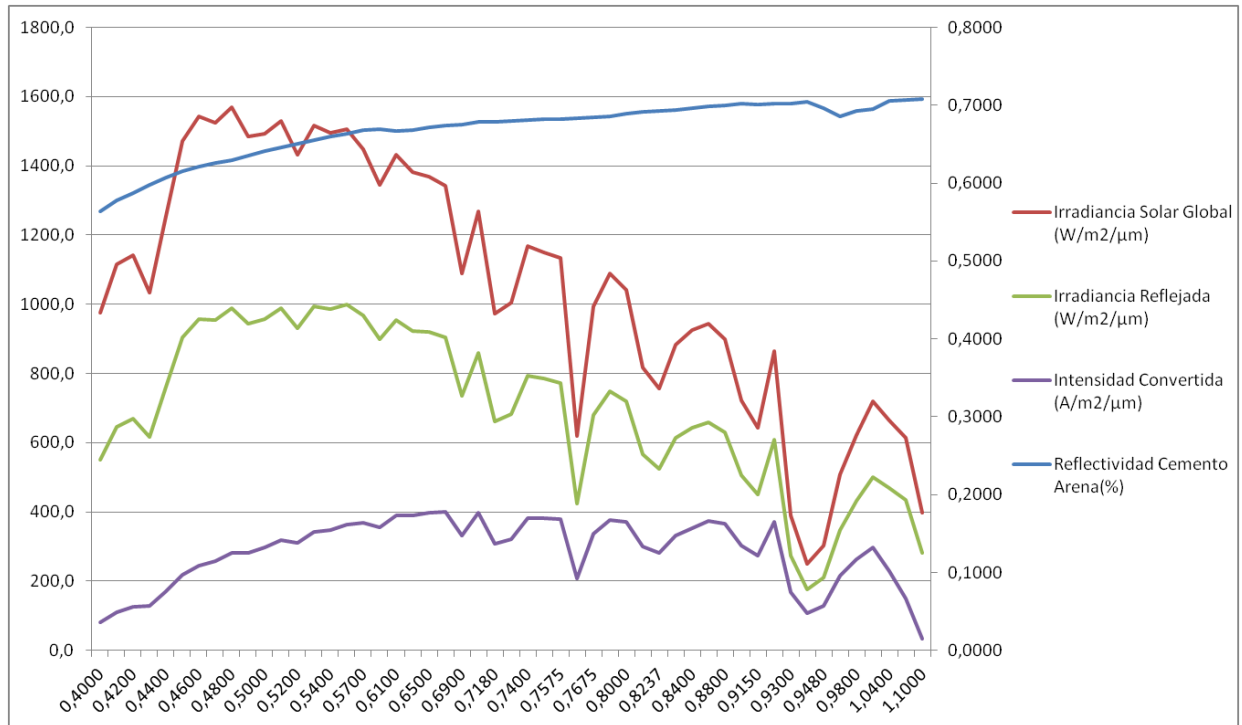


Figura C.62 CIGS-Cemento Blanco con Arena-Intensidad Convertida [33]

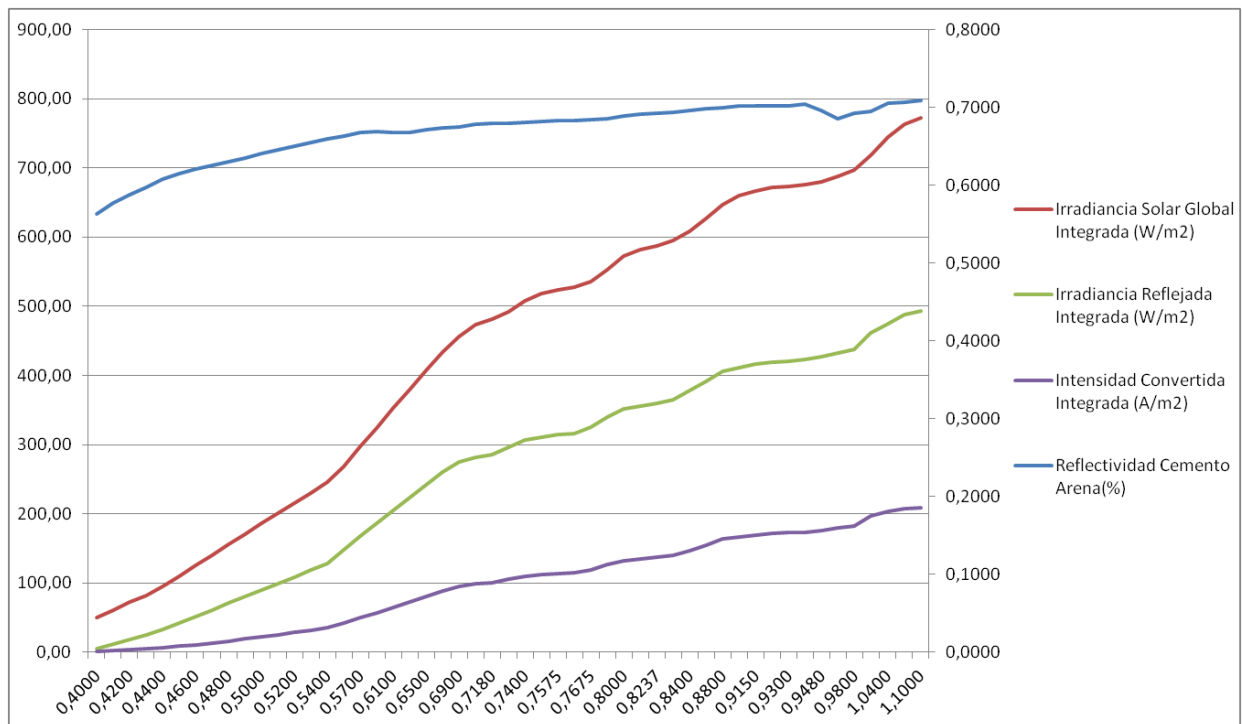


Figura C.63 CIGS-Cemento Blanco con Arena-Intensidad Convertida Integrada [33]

• Cemento Blanco Puro:

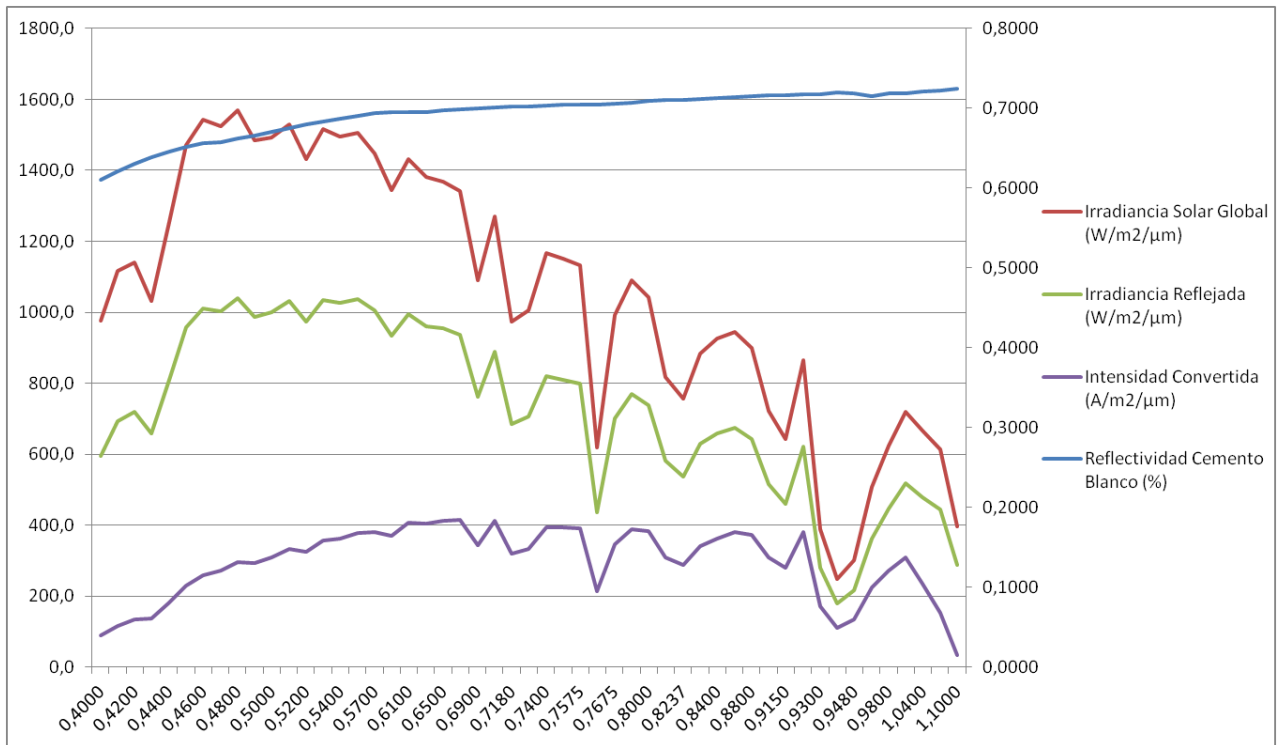


Figura C.64 CIGS-Cemento Blanco Puro-Intensidad Convertida [33]

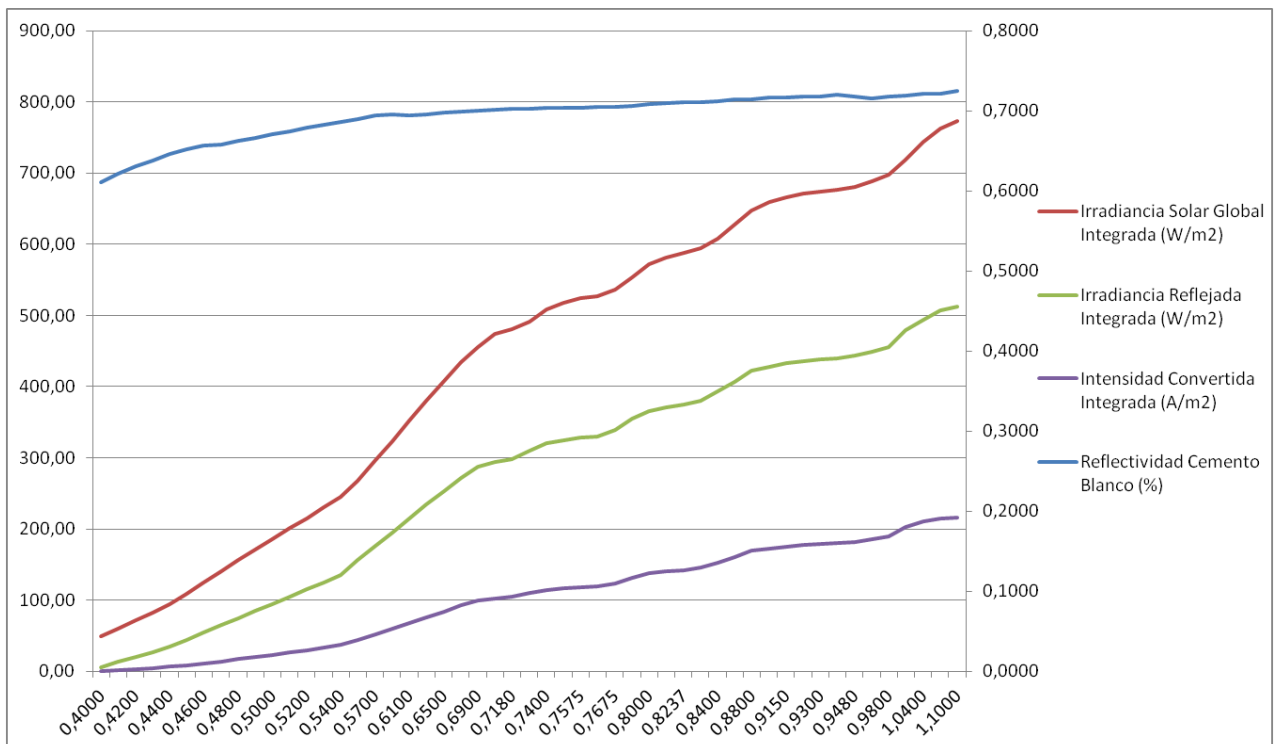


Figura C.65 CIGS-Cemento Blanco Puro-Intensidad Convertida Integrada [33]